

ACTA DE EVALUACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

Año académico 2016/17

DOCTORANDO: GÓMEZ PRADA, GUILLERMO

PROGRAMA DE DOCTORADO: D351 DOCTORADO EN CLIMA, ENERGÍA Y RIESGO AMBIENTAL

DEPARTAMENTO DE: FÍSICA Y MATEMÁTICAS

TITULACIÓN DE DOCTOR EN: DOCTOR/A POR LA UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

En el día de hoy 13/07/17, reunido el tribunal de evaluación nombrado por la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado y Doctorado de la Universidad y constituido por los miembros que suscriben la presente Acta, el aspirante defendió su Tesis Doctoral, elaborada bajo la dirección de WILLIAM DAVID CABOS NARVAEZ.

Sobre el siguiente tema: *ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LOS VIENTOS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y LAS ISLAS BALEARES*

Finalizada la defensa y discusión de la tesis, el tribunal acordó otorgar la CALIFICACIÓN GLOBAL³ de (no apto, aprobado, notable y sobresaliente): **SOBRESALIENTE**

Alcalá de Henares, 13 de Julio de 2017

EL PRESIDENTE

Fdo.: W. A. Gertner

EL SECRETARIO

Fdo.: M. Cortiz

EL VOCAL

Fdo.: Alfonso Izquierdo

Con fecha 24 de Julio de 2017 la Comisión Delegada de la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado, a la vista de los votos emitidos de manera anónima por el tribunal que ha juzgado la tesis, resuelve:

- ☒ Conceder la Mención de "Cum Laude"
☐ No conceder la Mención de "Cum Laude"

La Secretaria de la Comisión Delegada

[Firma]

FIRMA DEL ALUMNO,

GUILLERMO GÓMEZ PRADA

Fdo.: [Firma]

³ La calificación podrá ser "no apto" "aprobado" "notable" y "sobresaliente". El tribunal podrá otorgar la mención de "cum laude" si la calificación global es de sobresaliente y se emite en tal sentido el voto secreto positivo por unanimidad.

En aplicación del art. 14.7 del RD. 99/2011 y el art. 14 del Reglamento de Elaboración, Autorización y Defensa de la Tesis Doctoral, la Comisión Delegada de la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado y Doctorado, en sesión pública de fecha 24 de julio, procedió al escrutinio de los votos emitidos por los miembros del tribunal de la tesis defendida por GÓMEZ PRADA, GUILLERMO, el día 13 de julio de 2017, titulada *ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LOS VIENTOS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y LAS ISLAS BALEARES*, para determinar, si a la misma, se le concede la mención "cum laude", arrojando como resultado el voto favorable de todos los miembros del tribunal.

Por lo tanto, la Comisión de Estudios Oficiales de Posgrado **resuelve otorgar** a dicha tesis la

MENCIÓN "CUM LAUDE"

Alcalá de Henares, 27 julio de 2017
EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE ESTUDIOS
OFICIALES DE POSGRADO Y DOCTORADO



Firmado digitalmente por VELASCO
PEREZ JUAN RAMON - DNI
03087239H
Fecha: 2017.07.30 18:05:27 +02'00'

Juan Ramón Velasco Pérez

Copia por e-mail a:

Doctorando: GÓMEZ PRADA, GUILLERMO

Secretario del Tribunal: MARÍA JOSÉ ORTIZ BEVIÁ.

Director de Tesis: WILLIAM DAVID CABOS NARVAEZ



Universidad
de Alcalá

ESCUELA DE DOCTORADO
Servicio de Estudios Oficiales de
Posgrado

DILIGENCIA DE DEPÓSITO DE TESIS.

Comprobado que el expediente académico de D./D^a _____
reúne los requisitos exigidos para la presentación de la Tesis, de acuerdo a la normativa vigente, y habiendo
presentado la misma en formato: ☐ soporte electrónico ☐ impreso en papel, para el depósito de la
misma, en el Servicio de Estudios Oficiales de Posgrado, con el nº de páginas: _____ se procede, con
fecha de hoy a registrar el depósito de la tesis.

Alcalá de Henares a _____ de _____ de 20____



Fdo. El Funcionario



Universidad de Alcalá

DEPARTAMENTO DE FÍSICA Y MATEMÁTICAS

PROGRAMA DE DOCTORADO EN

CLIMA, ENERGÍA Y RIESGO AMBIENTAL

**ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE
LOS VIENTOS DE LA
PENÍNSULA IBÉRICA Y LAS ISLAS BALEARES**

TESIS DOCTORAL PRESENTADA POR

GUILLERMO GÓMEZ PRADA



Universidad de Alcalá

DEPARTAMENTO DE FÍSICA Y MATEMÁTICAS

PROGRAMA DE DOCTORADO EN

CLIMA, ENERGÍA Y RIESGO AMBIENTAL

**ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE
LOS VIENTOS DE LA
PENÍNSULA IBÉRICA Y LAS ISLAS BALEARES**

TESIS DOCTORAL PRESENTADA POR

GUILLERMO GÓMEZ PRADA

DIRECTOR

DR. WILLIAM DAVID CABOS NARVÁEZ

ALCALÁ DE HENARES, 2017.

Programa de Doctorado en
Clima, Energía y Riesgo Ambiental. D351.
Real Decreto 1393/2007

El Dr. Antonio Ruiz de Elvira, como director del departamento de Física y Matemáticas de la Universidad de Alcalá

CERTIFICA:

Que la presente Tesis Doctoral "*Estudio de la Evolución de los Vientos de la Península Ibérica y las Islas Baleares*" elaborada por D. Guillermo Gómez Prada, con la que opta al título de Doctor por la Universidad de Alcalá, dentro del Programa de Doctorado en "*Clima, Energía y Riesgo Ambiental*", se encuentra finalizada y reúne las condiciones necesarias para su tramitación y posterior defensa pública ante la correspondiente comisión.

Y para que así conste, y tenga los efectos oportunos, firmo este certificado en Alcalá de Henares, a 17 de Abril de 2017.

Director del departamento de Física y Matemáticas de la Universidad de Alcalá.



Dr. Antonio Ruiz de Elvira

El Dr. William David Cabos Narváez, profesor titular del departamento de Física y Matemáticas de la Universidad de Alcalá

CERTIFICA:

Que la presente Tesis Doctoral "*Estudio de la Evolución de los Vientos de la Península Ibérica y las Islas Baleares*" elaborada por D. Guillermo Gómez Prada, con la que opta al título de Doctor por la Universidad de Alcalá, dentro del Programa de Doctorado en "*Clima, Energía y Riesgo Ambiental*", se encuentra finalizada y reúne las condiciones necesarias para su tramitación y posterior defensa pública ante la correspondiente comisión.

Y para que así conste, y tenga los efectos oportunos, firmo este certificado en Alcalá de Henares, a 31 de Marzo de 2017.

El director de Tesis.



Dr. William David Cabos Narváez

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la evolución del campo de vientos en superficie en la Península Ibérica durante la primera mitad del Siglo XXI. Para ello se utilizan los resultados de las simulaciones de Modelos Regionales Climáticos (RCMs-Regional Climate Models) del proyecto ESCENA y del proyecto EUROCORDEX y los datos de las estaciones meteorológicas de ECA&D.

Para hacer este estudio, primeramente se analizó la capacidad de los RCMs para simular el campo de vientos de superficie en la actualidad, mediante comparación de las series temporales y las funciones de distribución de probabilidad de los modelos con las de ECA&D, para determinadas regiones del área analizada obtenidas mediante el método K-means.

Posteriormente, utilizándose los resultados de los modelos se regionalizó la Península Ibérica y las Islas Baleares desde el punto de vista eólico, para lo cual se utilizó una metodología desarrollada en esta tesis basada en el método de K-means. Estas regionalizaciones se usaron para estudiar el cambio entre el campo de velocidades del viento presente y futuro. Para analizar este cambio se hicieron dos análisis, uno basado en la variación de la velocidad media para las distintas regiones encontradas, y otro en el que se estudian las tendencias de las series temporales de las velocidades del viento.

Otros objetivos que también se estudiaron en este trabajo, fue el efecto que tiene el incremento de la resolución en los modelos sobre los resultados de las simulaciones. Además de analizar cómo afecta la elección de los RCMs y de los forzamientos a los campos de vientos dados por estos.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento al Dr. William Cabos Díaz Narvez por la confianza depositada en mí y sin su dirección, buenos consejos y saber hacer esta tesis no la hubiera podido llevar a cabo.

También querría darle las gracias al Dr. Giovanni Liguori, con el que compartí despacho los primeros años de la tesis, cuyos ánimos y consejos me fueron de gran utilidad para la realización de esta tesis.

Agradecer al grupo de Física del Clima de la Universidad de Alcalá de Henares, Dr. Antonio Ruiz de Elvira, Dra. María José Ortiz Bevia, Dr. Francisco José Álvarez García, por facilitarme y hacerme más llevadera la realización de la tesis, en especial al Dr. Miguel Tasambay Salazar con el que compartí despacho los últimos años.

Agradecer a los grupos de investigación que componen el proyecto ESCENA, ya que sin su labor esta tesis no se podría haber hecho, además de agradecerles sus consejos especialmente al Dr. Lluís Fita, Dr. Jesús Fernández, Dra. María Eugenia Magariño, Dr. Pedro Jiménez Guerrero, Dr. Juan Pedro Montávez, Dra. Marta Domínguez, Dra. Raquel Romera, y Dr. Miguel Ángel Gaertner. También querría hacer extensivo este agradecimiento al Dr. Dmitry Sein del Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research y a D. Sergio Lozano Galeana del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER).

Mi infinito agradecimiento a mis padres, familia y amigos por su infinita paciencia y apoyo, y por hacerme más fácil la tarea de escribir esta tesis.

Un agradecimiento especial a Dña. Cristina Cachaco Estevao, porque su insaciable curiosidad hizo posible que nos embarcáramos en la aventura de usar K-means para clasificar climas

Finalmente también me gustaría agradecer a todos aquellos que vinieron antes que yo, de cuyo saber, ciencia, y conocimiento tuve que beber para poder realizar esta tesis, porque sin su labor hubiera sido imposible llevar a cabo esta investigación, que espero que sirva de ayuda a otros que vengan detrás de mí.

Contenidos

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 La importancia de la energía eólica	1
1.2 Estudios de la Evolución del Viento	8
 Capítulo 2. Descripción de la Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona.....	 16
2.1 Técnicas de Clustering o Agrupamiento Analizadas para Estudiar la Evolución de los Vientos en la Península Ibérica e Islas Baleares	20
 Capítulo 3. Caracterización de los Vientos de Superficie de la Península Ibérica e Islas Baleares.....	 32
3.1 Orografía y posición geográfica de la Península Ibérica e Islas Baleares	32
3.2 Efectos de la Circulación General de la Atmósfera en el Clima de la Península.	34
3.3 Estudio de la Capacidad de los RCMs Usados en Esta Tesis Para Simular los Vientos de la Península Ibérica e Islas Baleares.	39

3.4	Regionalización de la Península Ibérica e Islas Baleares desde el Punto de Vista Eólico.	53
3.4.1	Criterio usado para obtener el número óptimo de clústeres para cada una de las regionalizaciones de los Conjuntos de RCMs usados para obtener la regionalización de la Península Ibérica y de Islas Baleares desde el punto de vista eólico.....	55
3.4.2	Regionalización desde el punto de vista eólico de la Península Ibérica y de las Islas Baleares para los RCMs del proyecto ESCENA y EUROCORDEX usados en esta tesis.	58

Capítulo 4. Estudio de la Evolución del Viento a 10 Metros de la Superficie para la Península Ibérica y las Islas Baleares Durante la Primera Mitad del Siglo XXI..... 64

4.1	Estudio de la Capacidad de los RCMs del Proyecto ESCENA Forzados por 20C3m ECHAM5-MPIOM Para Simular la Velocidad del Viento a 10 Metros de la Superficie en el Periodo de Control (1980-1999).	65
4.2	Estudio de la Evolución de la Velocidad del Viento en la Península Ibérica y la Islas Baleares Durante la Primera Mitad del Siglo XXI.	68
4.2.1	Variación de la velocidad del viento a 10 metros de la superficie en la Península Ibérica y en las Islas Baleares entre los periodos de 1980-1999 y 2031-2050.....	68

4.2.2	Evolución interanual de la velocidad del viento en superficie en la Península Ibérica y en las Islas Baleares en el periodo 2005-2050.	73
Capítulo 5	Estudio de la Robustez de la Bajada de Escala (Downscaling) de la señal climática Velocidad del Viento en Superficie para la Península Ibérica y las Islas Baleares.	78
Capítulo 6	Conclusiones.	86
Anexo I	Estudio realizado para decidir el método de clasificación a usar: K-means, agrupamiento jerárquico (varianza mínima de Ward), agrupamiento espectral, agrupamiento basado en densidad (Dbscan).	90
Anexo II	Metodología Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática Velocidad del Viento en Superficie Debida a la Elección de RCM.....	98
Bibliografía	109

Capítulo 1.

Introducción

En este punto se pretende describir de forma resumida el estado actual en el que se encuentra la implantación de la energía eólica en el Mundo, y las previsiones de futuro teniendo en cuenta los nuevos marcos políticos que se están creando debido a la mayor concienciación global con los peligros que supone el cambio climático.

También se describe en una segunda parte, las principales técnicas que existen actualmente para estudiar los campos de viento y el impacto que tiene el cambio climático sobre estos en distintas regiones del mundo.

1.1 La importancia de la energía eólica

Actualmente existe una gran preocupación por el agotamiento de las fuentes de energía no renovables, y las posibles consecuencias que el uso de éstas tiene en el clima. Una solución a ambos problemas, o al menos un paliativo, serían las energías renovables, entre las que se incluiría la eólica. El uso de las energías renovables parece mostrar una clara tendencia de crecimiento en los últimos años. Así 2015, según el GWEC (Global Wind Energy Council), [1] fue un año estelar tanto para la energía eólica como para el cambio de paradigma energético, culminando con el acuerdo de París, donde se convinieron a nivel mundial los objetivos a cumplir para mitigar las consecuencias negativas que la actividad humana tiene sobre el clima y preservar el medioambiente para las

Capítulo 1: Introducción

generaciones futuras. Lo que está por determinar son las acciones a tomar para obtener estos objetivos, donde las renovables jugarán sin lugar a dudas un papel crucial.

La generación de energía renovable se basa en tecnologías consolidadas a lo largo de todo el mundo, con un rápido crecimiento de su contribución a la producción de energía. Esto es debido, fundamentalmente a la reducción del costo de producción, a iniciativas políticas favorables, una mejora del acceso a la financiación, una mayor concienciación sobre el problema del cambio climático y de la seguridad energética, un crecimiento de la demanda de energía de los países en desarrollo y emergentes [2]. Esto ha hecho que una década de precios bajos de los combustibles fósiles no haya afectado de forma apreciable a la implantación de la energía solar y la eólica en el mundo.

Dentro de las medidas adoptadas a lo largo del 2015, cabría destacar además de los compromisos del G7 y del G20 para favorecer el acceso a las energías renovables y a la eficiencia energética. El acuerdo de la 21 Conferencia Internacional Sobre Cambio Climático de París, donde 195 países acordaron limitar el calentamiento global a 2 °C en 2100 sobre la temperatura previa a la era industrial, y según [3] para conseguir que el aumento de temperatura se mantuviese entre 2°C y 2,4°C sería necesario estabilizar la concentración de los gases de efecto invernadero entre 445 y 490 ppm de CO₂, lo que implica que será necesario reducir las emisiones mundiales de CO₂ entre un 50% y un 85% por debajo de los niveles de 2000 antes del 2050. Para conseguir estos objetivos de reducción de emisiones de CO₂ una gran mayoría de países se han comprometido a promover el uso de las energías renovables y de la eficiencia energética, a través de los llamados *Intended Nationally Determined Contributions (INDCs)*.

La firma de estos acuerdos internacionales sugieren que se ha iniciado la transición hacia un sistema energético mundial en el que las energías renovables jugarán un papel cada vez más importante. Así, [2] estima que las energías renovables proporcionaron en 2014 el 19,2% del consumo energético final a nivel mundial, y durante 2015 siguió aumentando la potencia instalada y la producción de energía de las renovables, estimándose que en 2015 se

Capítulo 1: Introducción

instalaron 147 GW adicionales en sistemas de energías renovables, el mayor incremento anual nunca registrado. También la inversión global en energías renovables ha marcado un nuevo record, a pesar de la caída de los precios de los combustibles fósiles, la fuerza del dólar, la debilidad de la economía europea y la continua reducción del precio por potencia instalada de la energía eólica y la solar. Por sexto año consecutivo la inversión neta en nuevas instalaciones de energías renovables ha sido superior a la de los combustibles fósiles, incrementándose el compromiso de los inversores privados con las energías renovables.

Junto con este incremento de las inversiones, en 2015 ha habido desarrollos técnicos que han representado mejoras dentro de las energías renovables y la eficiencia energética, incrementándose el uso de las tecnologías de Smart Grid y la integración de las energías renovables, además del desarrollo y mejora de las tecnologías de almacenamiento y comercialización.

Si se analiza la energía eólica en particular. Se puede ver, según [1], que 2015 fue otro año excelente. Después de superar los 50GW instalados en 2014, en 2015 se alcanzó un total del 63 GW de potencia instalada, un incremento del 22%. Consiguiéndose al final del año un total de potencia eólica acumulada de 433 GW; siendo la energía eólica la tecnología que más creció a nivel mundial en todo 2015, según la IEA.

Siendo China quien lideró este incremento con un record de 30.8GW de potencia instalada, superando el del 2014 para potencia instalada en un único año. Alcanzando en 2015 los 145GW de potencia eólica acumulada, más que toda la Unión Europea; superando en el último año los 100 mil millones de USD de inversión en renovables en un único año. En lo que respecta al resto de Asia. La India representa el principal mercado, alcanzando en 2015 el 4º puesto en potencia total acumulada a nivel mundial, superando a España, siendo en 2015 el quinto mercado eólico a nivel mundial. También otros países asiáticos como Paquistán, Filipinas, Vietnam, Tailandia, Mongolia e Indonesia empiezan a ser mercados maduros.

En Europa el mercado eólico, también ha mostrado un sorprendente buen comportamiento en 2015, liderado por Alemania, con un record de 6GW en

Capítulo 1: Introducción

nuevas instalaciones, de las cuales 2GW han sido en instalaciones offshore; por otro lado el mercado de US también ha mostrado un comportamiento mucho mejor del esperado con un cuarto puesto a nivel mundial con 8,6GW instalados.

Para países como Brasil, Canadá, Méjico y Sudáfrica 2015 también fue un buen año desde el punto de vista eólico. En otros países como Jordania, Guatemala y Serbia se instalaron en 2015 los primeros campos eólicos comerciales. Siendo este tal vez el principal signo de la fortaleza de las energías renovables en general y de la eólica en particular, la continua aparición de nuevos mercados a lo largo de África, Asia y Latino América.

Si miramos hacia un futuro próximo, se puede esperar un crecimiento estable. Asia continuará liderando el crecimiento, y Europa irá cumpliendo los compromisos del 2020 [1] , aunque en este camino hacia esos objetivos podría encontrarse con algunas dificultades. Por otro lado en Norte América, tanto Estados Unidos como Canadá parecen preparados para otro periodo de crecimiento, mientras que en Méjico es esperable que la nueva liberalización del mercado de paso a un periodo de rápido crecimiento del mercado eólico.

En Latino América, es esperable que Brasil continúe liderando el mercado eólico, pero acompañado por otros actores como Chile, Perú, Uruguay y también Argentina. En África y Oriente Próximo, además de Sudáfrica como principal productor de energía eólica, aparecen Marruecos y Egipto que reúnen las condiciones necesarias para que su mercado eólico crezca de forma sólida durante los próximos años, además también parece que otros mercados más pequeños como el de Kenia o Etiopía están despegando. En la Tabla 1 se recoge la potencia instalada a 2015 en las distintas regiones del mundo.

Capítulo 1: Introducción

GLOBAL INSTALLED WIND POWER CAPACITY (MW) – REGIONAL DISTRIBUTION				
		End 2014	New 2015	Total End 2015
AFRICA & MIDDLE EAST				
	South Africa	570	483	1,053
	Morocco	787	-	787
	Egypt	610	200	810
	Tunisia	245	-	245
	Ethiopia	171	153	324
	Jordan	2	117	119
	Other ¹	151	-	151
	Total	2,536	953	3,489
ASIA				
	PR China	114,609	30,753	145,362
	India	22,465	2,623	25,088
	Japan	2,794	245	3,038
	South Korea	610	225	835
	Taiwan	633	14	647
	Pakistan	256	-	256
	Thailand	223	-	223
	Philippines	216	-	216
	Other ²	167	-	167
	Total	141,973	33,859	175,831
EUROPE				
	Germany	39,128	6,013	44,947
	Spain	23,025	-	23,025
	UK	12,633	975	13,603
	France	9,285	1,073	10,358
	Italy	8,663	295	8,958
	Sweden	5,425	615	6,025
	Poland	3,834	1,266	5,100
	Portugal	4,947	132	5,079
	Denmark	4,881	217	5,063
	Turkey	3,738	956	4,694
	Netherlands	2,865	586	3,431
	Romania	2,953	23	2,976
	Ireland	2,262	224	2,486
	Austria	2,089	323	2,411
	Belgium	1,959	274	2,229
	Rest of Europe ³	6,564	833	7,387
	Total Europe	134,251	13,805	147,771
	of which EU-28 ⁴	129,060	12,800	141,578
LATIN AMERICA & CARIBBEAN				
	Brazil ⁵	5,962	2,754	8,715
	Chile	764	169	933
	Uruguay	529	316	845
	Argentina	271	8	279
	Panama	35	235	270
	Costa Rica	198	70	268
	Honduras	126	50	176
	Peru	148	-	148
	Guatemala	-	50	50
	Caribbean ⁶	250	-	250
	Others ⁶	285	-	285
	Total	8,568	3,652	12,220
NORTH AMERICA				
	USA	65,877	8,598	74,471
	Canada	9,699	1,506	11,205
	Mexico	2,359	714	3,073
	Total	77,935	10,817	88,749
PACIFIC REGION				
	Australia	3,807	380	4,187
	New Zealand	623	-	623
	Pacific Islands	12	0,6	13
	Total	4,442	380,6	4,823
World total		369,705	63,467	432,883
				Source: GWEC

¹ Algeria, Cape Verde, Iran, Israel, Kenya, Libya, Nigeria
² Bangladesh, Mongolia, Sri Lanka, Vietnam
³ Bulgaria, Cyprus, Czech Republic, Estonia, Finland, Faroe Islands, FYROM, Hungary, Iceland, Latvia, Liechtenstein, Lithuania, Luxembourg, Malta, Norway, Romania, Russia, Switzerland, Slovakia, Slovenia, Ukraine
⁴ Austria, Belgium, Bulgaria, Cyprus, Croatia, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, UK
⁵ Caribbean: Aruba, Bonaire, Curacao, Cuba, Dominica, Guadalupe, Jamaica, Martinica, Granada, St. Kitts and Nevis
⁶ Bolivia, Colombia, Ecuador, Nicaragua, Venezuela
 Note: Project decommissioning of approximately 290 MW and rounding affect the final sums
 * Projects fully commissioned, grid connections pending in some cases

Tabla 1: Distribución en regiones del mundo de la potencia eólica instalada en el año 2015. Ref. [1]

Capítulo 1: Introducción

A la vista de estos resultados parece ser que a nivel mundial las energías renovables, y entre ellas la eólica, están desplazando a las energías fósiles.

Si se analizan las perspectivas del mercado eólico europeo para los próximos 15 años hasta el 2030, se tiene que según [4] el escenario central de la EWEA (European Wind Energy Association), la potencia instalada en Europa en 2030 sería de 320 GW, de los cuales 254 GW serían “onshore” y 66 GW “offshore”. Lo que significa que la potencia eólica instalada sería aproximadamente dos veces y media la existente en 2014. Esta potencia instalada produciría 778 TWh de electricidad, lo que satisfecería el 24,4% de la demanda eléctrica europea, y se evitaría la emisión de 436 millones de toneladas de CO₂. Aunque para el escenario menos favorable que usa la EWEA, estas cifras se reducirían, pasando la potencia instalada a ser de 251 GW, lo que implicaría una reducción del 22% respecto al escenario central, aún así prácticamente se estaría doblando la potencia instalada en 2014. Así, para este escenario más desfavorable, la electricidad producida por el viento se prevé que supondría el 19% de la demanda de electricidad de la Unión Europea en 2030 y una reducción de 339 Mt de CO₂ en emisiones.

De todas formas, el futuro desarrollo del mercado eólico vendría muy afectado por las distintas regulaciones que irán apareciendo a lo largo de este periodo, ya que para que el mercado eólico sea capaz de desarrollarse en su plenitud necesita políticas a largo plazo y mercados de trabajo estables, medidas cortoplacistas o la falta de estabilidad en la dirección de estas podrían producir una reducción de las inversiones, por ejemplo, Bulgaria instaló 280 MW en 2010 mientras que sólo 9 MW en 2014, lo mismo le ocurre a Rumanía donde en 2012 la potencia instalada en ese año fue de 923 MW mientras que en 2014 está pasó a ser sólo 354 MW. En ambos países, al igual que en España, políticas retroactivas han hecho que el desanimo cunda entre los inversores dando lugar a una ralentización del crecimiento del mercado eólico e incluso su total paralización. El efecto de la falta de estabilidad en el marco legislativo puede suponer un fuerte lastre en el desarrollo del mercado eólico y de las renovables de un país, donde España es un ejemplo paradigmático de este último caso, en el cual la potencia instalada en 2014 fue cero.

Capítulo 1: Introducción

Para evitar políticas diferentes entre los distintos países de la unión europea y marcar unos objetivos comunes en materia de energía. En Febrero del 2015, la Comisión Europea estableció los principios en los que se debería basar la Unión Energética de Europa, según [5] su finalidad sería la de ofrecer a los consumidores de la UE, una energía segura, competitiva y asequible, para ello establece los pilares en los que debe basarse esta unión para conseguir estos objetivos, que fundamentalmente se podrían reducir en los 5 siguientes:

- seguridad energética, solidaridad y confianza.
- un mercado europeo de la energía plenamente integrado.
- eficiencia energética como contribución a la moderación de la demanda.
- descarbonación de la economía.
- investigación, innovación y competitividad.

Luego aparentemente ya está en marcha a nivel mundial el cambio de paradigma energético, en el que los sistemas de producción de energía basados en fuentes no renovables van siendo substituidas por estas, y donde la eólica en particular va liderando el cambio.

Por otro lado, además de cuestiones puramente regulatorias, otro fenómeno que podría afectar a la implantación de las renovables y en especial la eólica, es el propio cambio climático, ya que según [6] este podría modificar la distribución y/o la variabilidad de vientos, tener impactos sobre los periodos de funcionamiento de los aerogeneradores, su mantenimiento y diseño de los mismos, reducción de la densidad media del aire por el calentamiento de este, cambios en la rugosidad del suelo por variaciones en la vegetación, cambios en el nivel del mar y en la línea de costa,...

1.2 Estudios de la Evolución del Viento

El impacto de la actividad humana en la evolución del clima ha sido fundamentado por numerosísimos estudios realizados por distintas disciplinas científicas, cuyos resultados han sido resumidos en las conclusiones de los informes de evaluación del IPCC. Y aunque la mayoría de los esfuerzos de la comunidad científica se han centrado en el estudio del impacto de los distintos escenarios de cambio climático en los campos de precipitación y temperatura, existe cierto número de publicaciones que estudian el efecto del cambio climático sobre el potencial eólico.

La información climática del futuro, en particular la referente a la velocidad de viento, es proporcionada por los modelos climáticos globales (GCM). Los GCMs son considerados por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) como las herramientas más avanzadas disponibles hoy en día para simular la respuesta del clima mundial a la liberación de gases de efecto invernadero. Normalmente, los GCMs se usan para estudiar el clima de la Tierra durante largos periodos de tiempo, y como el clima es uno de los sistemas físicos más complejos que existen, su modelación implica que para que el coste computacional sea asumible, para resolver numéricamente las ecuaciones de los fluidos geostrofos que describen el comportamiento de la atmósfera y el océano, la discretización correspondiente tiene que limitarse a unos pocos millones de nodos, lo que hace que el tamaño de celda resultante de la discretización del problema sea de algunos cientos de kilómetros cuadrados. Esta resolución resulta insuficiente para apreciar muchos de los fenómenos climáticos regionales y locales que se desarrollan en escalas espaciales de que pueden llegar a ser de unos pocos kilómetros. Por ello, para estudiar la evolución de los vientos fundamentalmente se realiza una bajada de escala (downscaling en inglés) de los resultados obtenidos de uno o varios GCMs (General Circulation Models).

Se entiende el downscaling como las técnicas que se usan para inferir la información que dan los GCM a una escala espacial de baja resolución a una escala local de mayor resolución con el objeto de poder apreciar los fenómenos climáticos debidos a causas locales. Las técnicas de Downscaling se pueden

Capítulo 1: Introducción

clasificar en dos grandes familias [7]: El downscaling estadístico , donde los valores de alta resolución (predictandos) se obtienen de aplicar relaciones previamente encontradas a los campos predictores de los GCMs [8] y el downscaling dinámico [9] y [10], donde mediante el anidamiento de RCMs (Regional Climate Models) se obtienen campos de alta resolución. En la mayoría de los artículos estudiados la técnica de Downscaling que se usa implica la utilización de RCMs para aumentar la resolución de los datos.

Los RCM son una poderosa herramienta para mejorar la resolución de los GCMs sin que esto implique un sobre coste computacional excesivo [11] y [12] , lo que permite por ejemplo, según [13] y [10], una mejor simulación de eventos extremos, fenómenos locales como los costeros.

Actualmente, solo los modelos climáticos regionales, a partir de los datos globales proporcionados por los GCMs, tienen la capacidad de poder estimar el efecto del cambio climático en una región de manera físicamente consistente. Además, los modelos regionales permiten una mejor representación de los accidentes geográficos, que son determinantes para poder simular el clima local, en particular, el comportamiento del viento en una región. Por lo que es necesario utilizar técnicas de Downscaling para alcanzar la resolución necesaria para una representación adecuada de éstos. La técnica de bajada de escala dinámica, que implica la utilización de RCMs, se considera que es el mejor método para estimar el efecto del cambio climático a nivel regional [14]. Según [15] los modelos regionales atmosféricos son herramientas que permiten mejorar la resolución de los datos climáticos a partir de los resultados de GCMs, ya que representan con mayor detalle los accidentes orográficos, las zonas costeras, los distintos tipos de vegetación... por lo que es lógico pensar que los resultados de los RCMs son más próximos a la realidad que los de los GCMs. en [15] demuestran que el downscaling dinámico no aporta más información sobre los campos de velocidades del viento en zonas oceánicas abiertas, pero si lo hacen sobre zonas costeras con orografía compleja.

Esto es especialmente cierto sobre todo en zonas que presentan una gran heterogeneidad climática como es el caso de la Península Ibérica [16], y más aún si dicha zona presenta a su vez una gran complejidad orográfica, la

Capítulo 1: Introducción

Península Ibérica en líneas generales está formada, por una gran meseta central, con tres grandes depresiones y seis sistemas montañosos, todo esto en una superficie de 582.000 km².

Así aplicando distintas técnicas de downscaling a las salidas de diversos modelos climáticos globales, se han realizado diversos estudios sobre las previsiones de variación de la velocidad del viento en el S. XXI en diversas zonas del mundo. Así por ejemplo, para Sudamérica se tiene que [17] obtiene que para Brasil, el cambio climático tendrá un impacto positivo sobre el potencial eólico. Obteniendo distintas proyecciones climáticas que sugieren incrementos importantes en el recurso eólico en zonas costeras y en la región noreste del país, mientras que en [18] donde se analizan los vientos de la costa Oeste de Sudamérica, se obtiene también un incremento de estos sobre todo durante la primavera y el verano además de observar un incremento en la duración y la frecuencia de las corrientes de viento a lo largo de la costa.

Para Norteamérica, y fundamentalmente para Estados Unidos también habría una serie de estudios en los que se analizan los efectos del cambio climático sobre el potencial eólico de la zona, así [19] obtiene que en Estados Unidos la velocidad del viento podría sufrir un descenso medio entre el 1,0 y el 3,2% en los próximos 50 años y entre 1,4 y 4,6% en los próximos cien años. Mientras [20] obtiene que para el periodo (2040-2062) hay cierta tendencia de disminución de la velocidad del viento en el oeste de USA. [21] estudia los regímenes de viento en el Noroeste de Estados Unidos en el siglo XXI obteniendo una reducción de la velocidad de estos, sobre todo en verano cuando la velocidad de los vientos se podría reducir entre el 5-10%, aunque en invierno obtiene que esa disminución podría ser despreciable e incluso la velocidad de los vientos podría aumentar ligeramente. También hay estudios de la variación de potencial eólico en zonas más reducidas, así [22] estudia la evolución de los vientos en dos granjas de molinos de viento ubicadas en Oklahoma para el periodo de tiempo entre 2040-2069, dando como resultado un incremento irregular de la velocidad de los vientos por estación, e incluso una disminución de esta en otoño durante algún periodo de tiempo. Aunque su

Capítulo 1: Introducción

conclusión principal es que los estudios de potencial eólico actuales no caracterizan de forma adecuada la producción futura.

También hay trabajos en los que mediante técnicas de downscaling aplicadas sobre modelos climáticos globales se estudia el potencial eólico en otras zonas del mundo como Asia y África. Así, [23] analiza las variaciones de la velocidad del viento máximas en China para los periodos de tiempo 2046-2065 y 2080-2099. Obteniendo una reducción de las velocidades máximas de viento en 1,46m/s por década. [24] estudia los efectos que tiene sobre la evolución de los vientos del estrecho de Taiwan el cambio climático durante tres periodos del siglo XXI. Dando como resultado una ligera reducción de la densidad de energía eólica en el estrecho. Por otro lado [25] estudia entre otras cosas la evolución de los recursos eólicos en Sudáfrica, resultando que estos apenas variarán en el año 2050 con respecto al actual.

En lo que se refiere a Europa, también se han realizado diversos estudios basados en modelos climáticos con el objeto de prever el impacto que pudiera tener el cambio climático sobre la velocidad del viento en Europa y por lo tanto en el potencial eólico. Así en [26] se analiza el impacto del cambio climático sobre los vientos de superficie del norte de Europa, obteniendo un pequeño incremento del potencial eólico para el periodo (2071-2100) respecto al control (1961-1990). cuando se utilizó como condiciones de contorno el AOGCM (Modelo Atmósfera-Océano Climático Global Atmósfera-Océano) ECHAM4/OPYC3 para los Modelo Regionales Climáticos (RCM), mientras cuando se usó como condiciones de contorno el Modelo Climático Global (GCM) HadAM3H, el cual es solamente atmosférico, no se apreció a penas cambio en la velocidad de los vientos e incluso en algunos casos una ligera disminución. En [27] se estudia la evolución de los vientos en el Mediterráneo oriental para el periodo (2071-2100), resultando un incremento general de estos en tierra y una disminución en el mar, excepto para el mar Egeo donde se obtiene un incremento importante de la velocidad de los vientos. [28] Analiza la evolución del potencial eólico en el Norte de Europa, dando como resultado una falta clara de evidencia de cambio, siendo esperable que durante los próximos sesenta años el potencial eólico permanezca más o menos estable

Capítulo 1: Introducción

en el norte de Europa. En [29] se analiza el potencial eólico del norte de Europa para el periodo de tiempo comprendido entre 2020 y 2049, obteniendo una reducción generalizada entre el 2 y el 6% del potencial eólico offshore. En [30] se obtuvo para el periodo 2081-2100 una ligera reducción de la velocidad media de los vientos y la densidad de energía para el norte de Europa respecto a las obtenidas durante 1961-1990. En [31] se estudia el impacto que puede tener el cambio climático sobre la generación de energía eólica en toda Europa, dando como resultado un incremento del potencial eólico en el norte y centro de Europa especialmente en invierno y otoño, mientras que encontró una disminución en el sur de Europa, excepto en algunas áreas como puede ser el mar Egeo.

También se han utilizado técnicas de downscaling basadas en RCM para estudiar el efecto del cambio climático sobre el potencial eólico en determinadas regiones de Europa. Por ejemplo, en [32] se estudia cómo puede afectar el cambio climático al recurso eólico en el Reino Unido en el 2080 para lo cual se usaron los escenarios publicados por el UK Climate Impacts Programme en 2002. Obteniendo un ligero incremento del 0,5% del viento medio anual en UK. Aunque si se estudian las tendencias de la producción de energía eólica por estación, se obtiene que en invierno la producción crecería hasta un 15% en el Sur, mientras en el Norte caería. Por otro lado en verano la producción podría caer hasta el 10% aunque en algunas áreas esta reducción podría ser incluso mayor. En [33] se analizaría cómo podría afectar el cambio climático a los vientos del periodo (2046-2065) con respecto al periodo (1971-2000) en Francia. Obteniéndose cambios significativos en los regímenes de viento, en particular una disminución de la velocidad del viento en la zona del Mediterráneo. En [34] se estudiaría el impacto que podría tener el cambio climático sobre el potencial eólico en Irlanda para el periodo 2021-2060 respecto a 1961-2000 para distintos escenarios. Dando como resultado un incremento de la energía en invierno y una reducción en verano.

En esta tesis se decidió utilizar la técnica de Downscaling dinámico, la cual implica la utilización de RCMs. La cual consiste básicamente en utilizar los

Capítulo 1: Introducción

resultados de los GCMs como condiciones de contorno de los RCMs, a esto se llama anidamiento.

Aunque el anidamiento de un RCM en un GCM puede tener efectos no deseables sobre los resultados del RCM, ya que estos pueden heredar los defectos y limitaciones del GCM. Para evitar esto, lo que se suele hacer es trabajar con ensembles de RCMs y de GCMs.

Para analizar el comportamiento de los vientos en la Península Ibérica, en esta tesis se utilizaron una serie de conjuntos de RCMs y de GCMs. A continuación se enumeran dichos RCMs y los forzamientos usados como condiciones de contorno para esos RCMs:

- Se utilizaron los resultados de los RCMs (PROMES, MM5, REMO y WRF) obtenidos dentro del proyecto ESCENA. El proyecto ESCENA (2008-2012) es una iniciativa española, financiada por el Ministerio Español de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, la cual tiene como objetivo utilizar técnicas de downscaling dinámico para generar escenarios de cambio climático sobre la Península Ibérica, las islas Baleares y Canarias, para lo cual usa un ensemble de RCMs con una resolución de 25 km^2 , [35]. Los cuales fueron forzados por:
 - ERA-Interim: ERA-Interim es la base de datos atmosféricos de reanálisis más actual del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast). [36]. En esta tesis se utilizó esta base de datos como forzamiento de los RCMs de ESCENA para validar los resultados de los modelos regionales por comparación con los datos ECA&D (European Climate Assessment & Dataset). ECA&D es una colección de series de datos atmosféricos diarios de Europa y de la zona del Mediterráneo, obtenidas a partir de mediciones de estaciones meteorológicas, proporcionadas por los distintos servicios meteorológicos e hidrológicos de los países participantes en ECA&D después de pasar los filtros de calidad impuestos dentro del proyecto [37]. La razón por la que se usó una base de datos de reanálisis como forzamiento de los RCMs para la validación de los resultados de estos, se debe a que estas

están concebidas para que a partir de la asimilación de grandes cantidades de observaciones a través de determinados algoritmos proporcionen el estado de la atmósfera más próximo al real en zonas donde no hay mediciones, por lo que es esperable que los resultados de los RCMs forzados por bases de datos de reanálisis sean más parecidos a la realidad que aquellos que resultan de los modelos regionales forzados por GCMs, por lo que es bastante normal utilizar RCMs forzados por bases de datos de reanálisis para estimar el error asociado a los resultados de estos [38] y [39].

- 20C3M ECHAM5-MPIOM: Se utiliza este GCM para obtener los resultados históricos de los modelos regionales de ESCENA para el periodo 1980-1999, resultados que se usarán de Control para cuantificar como de malos son los resultados de los RCMs respecto a cuando estos son forzados por ERA-Interim y para estimar el efecto del cambio climático en la velocidad del viento, mediante comparación directa con los resultados obtenidos por los RCMs para el periodo 2031-2050.
- ECHAM5-MPIOM A1B escenario: para obtener el campo de velocidades de viento de la Península Ibérica e Islas Baleares para el periodo 2031-2050, y así por comparación con el campo de vientos para el periodo de Control obtener la variación de este y para calcular las tendencias de la evolución del viento para este periodo.
- En esta tesis también se usaron datos generados por algunos de los RCMs que participaron en el proyecto EUROCORDEX. Este proyecto es la parte europea del programa internacional CORDEX, que es una iniciativa del WCRP (World Climate Research Program) para coordinar un marco de trabajo con el objeto de obtener proyecciones climáticas regionales de alta resolución a todo lo largo del mundo. Así dentro del proyecto EUROCORDEX se han realizado un conjunto de simulaciones climáticas para la región de Europa, para dos tipos de resoluciones espaciales (EUR-44, ~50km) and (EUR-11, ~12,5km) [[Pag. 14](http://www.euro-</div><div data-bbox=)

Capítulo 1: Introducción

cordex.net/index.php.en]. En esta tesis se utilizaron tres conjuntos distintos de RCMs con una resolución de ~12,5km:

- Conjunto 1: Se utilizaron 5 RCMs (RACMO22E, HIRHAM5, CCLM4, RCA4 y WRF331F) forzados por ERA-Interim con el objeto, al igual que para el proyecto ESCENA, de poder validar los resultados de los modelos regionales por comparación con los datos ECA&D.
- Conjunto 2: Se utilizaron 4 RCMs (RACMO22E, HIRHAM5, CCLM4 y RCA4) forzados por un único GCM (ICHEC-EC-EARTH), con el objeto de poder estudiar el efecto que tiene en el resultado final la elección del modelo climático regional. El criterio de elección de los RCMs se basó en formar el conjunto mayor de modelos regionales del proyecto EUROCORDEX que estuvieran forzados por el mismo GCM.
- Conjunto 3: Se utilizó un único RCM (RCA4) forzado por 5 GCMs (CNRM-CM5, EC-EARTH, CM5A-MR, HadGEM2-ES y MPI-ESM-LR) con el objeto de analizar el efecto que tiene la elección del GCM como forzamiento para un RCM en los resultados de este. Se eligió RCA4 porque era el RCM del proyecto EUROCORDEX que era forzado por el mayor número de GCMs distintos.

Capítulo 2.

Descripción de la Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona.

A la hora de estudiar la evolución de los vientos de una región, uno de los problemas que hay que resolver antes de poder utilizar los resultados obtenidos de los RCMs, es cómo validar los resultados proporcionados por los modelos. La forma más habitual de hacerlo es correr los modelos en una época en la que hay registros climáticos y comparar los resultados de los modelos con los registros. Pero esto presenta una dificultad, ya que los datos registrados provienen fundamentalmente de estaciones meteorológicas, es decir son datos muy locales y el viento es una magnitud a la que le afecta mucho las características orográficas de la zona, mientras que los resultados de los modelos tanto los GCMs como los RCMs representan el valor de la velocidad del viento de zonas que en el caso de los primeros puede ser de cientos de kilómetros cuadrados mientras en el caso de los segundos son de decenas de kilómetros. Por lo que aunque ambas magnitudes, las de las estaciones meteorológicas y las de los modelos climáticos, puedan ser la velocidad del viento superficial a 10m, realmente no son la misma ya que la de las estaciones meteorológicas son valores muy localizados y la que proporcionan los modelos representan áreas más grandes. Para solventar esta dificultad se pueden seguir diversas estrategias, así [19] lo que hace es coger dos regiones de Estados Unidos significativas desde el punto de vista del potencial eólico, y

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

comparar los valores de velocidad estacionales medios de los GCMs usados con los de la base de datos empleada, la idea es que al tomar los valores medios estacionales los efectos locales de los valores medidos se difuminen. [21] para validar los resultados de los GCMs y los resultantes del Downscaling, en este caso se estudian más magnitudes que únicamente la velocidad del viento, lo que hacen es comparar dichos valores con las medias mensuales de estaciones meteorológicas situadas en distintos aeropuertos de la geografía de USA. En [27] para medir la capacidad del RCM para simular los vientos en superficie, lo que se hizo fue comparar los resultados del modelo con una resolución de unos $(0,22^{\circ} \times 0,22^{\circ})$ con la de los datos de reanálisis de ERA 40 con una resolución de $(1^{\circ} \times 1^{\circ})$. En este caso se usó como patrón datos de reanálisis y no los medidos por estaciones meteorológicas, con lo que se suprimen los fenómenos locales que pueden afectar a las medidas de las estaciones. En [18] para validar mediante comparación los valores simulados y los datos medidos de la velocidad del viento en la costa oeste de Sudamérica, lo que se hizo fue obtener las distribuciones de las frecuencias de las velocidades del viento para la zona estudiada y compararlas entre sí. [17] en este caso toma como referencia el campo de vientos anual medio del Atlas do Potencial Eólico Brasileiro 2001 realizado por el CEPEL (centro de Pesquisas de Energia Elétrica), el cual es discretizado en áreas de $50 \times 50 \text{ km}^2$ con el objeto de poder compararlo directamente con las salidas de los modelos climáticos, para ello calculan el valor medio de cada celda. En [40] para evaluar la capacidad de los GCMs usados para simular el viento geostrófico, se compararon los resultados de los modelos con los datos de ERA40, para lo cual se tuvo que interpolar los valores de ERA40 mediante splines cúbicos, de forma que coincidieran los grids de los modelos y de la base de datos de reanálisis. En [24] se analizan los vientos en el estrecho de Taiwan, para lo cual realizan mediante el WRF un downscaling dinámico del campo de vientos obtenido a partir del modelo climático global desarrollado por la MRI-JMA (Meteorological Research Institute – Japan Meteorological Agency), para validar los resultados del downscaling utilizan los datos de una única estación meteorológica situada en el estrecho, para lo cual calculan las distribuciones mensuales de la velocidad del viento para el periodo (1981-2000) y las comparan con las de la celda del WRF en las que está situada la estación

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

meteorológica. En [31] para validar los resultados de los modelos regionales forzados por ECHAM, los comparan con los resultados de los modelos forzados por la base de datos de reanálisis ERA-40, consiguiendo que se comparen magnitudes iguales, ya que en ambos casos el grid es el mismo. En [34] para validar la capacidad de los modelos para simular el comportamiento de los vientos en Irlanda en el futuro, lo que se hace es comparar las salidas del modelo regional RCA3 cuando es forzado por ERA-40, ECHAM4 y ECHAM5 con los datos reales de cuatro estaciones meteorológicas para el periodo 1961-2000. Para poder comparar los resultados de las simulaciones con los datos reales se interpolan los primeros mediante una función bilineal a los puntos en los que están ubicadas la estaciones, para posteriormente comparar entre sí las distribuciones de viento y las medias mensuales que dan las simulaciones de control y los resultados medidos, entre otras técnicas.

En esta tesis para evaluar la capacidad de los RCMs para simular los vientos de la Península Ibérica a una altitud de 10 metros, tal y como se comentó antes, lo que se hizo fue comparar el campo de vientos que daban los modelos con los datos recogidos por las estaciones meteorológicas de ECA&D. Previamente a la comparación, se analizó la calidad de los datos de velocidades del viento aportado por la base de datos de ECA&D, para ello se localizó el periodo de 30 años que tenía el mayor número de estaciones meteorológicas cuyos valores no válidos eran inferiores al 10%. Obteniéndose el periodo 1983-2013, donde 71 estaciones de las 112 estaciones ubicadas en España presentaban un número de valores no válidos inferior al 10% del total. Otro problema que presenta la bases de datos de ECA&D, el cual no se pudo solucionar, es que las estaciones meteorológicas ubicadas en Portugal no tienen datos de viento, por lo que no se ha podido validar el campo de vientos que los RCMs dan para Portugal.

Para evaluar la capacidad de los RCMs usados para simular el campo de vientos a 10 metros de altitud, se utilizó como forzamiento una base de datos de reanálisis al igual que [27], [40], [31] y [34], sólo que en este caso se decidió usar ERA-Interim. La razón de usar en la validación una base de datos de reanálisis como forzamiento se debe a que, tal y como se comentó anteriormente, estas son elaboradas a partir de la asimilación de grandes

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

cantidades de datos observados, por lo que es esperable que los resultados de los RCMs forzados por tales bases de datos sean más parecidos a la realidad, que los forzados por GCMs.

Otro problema que presenta la validación del campo de vientos resultante de los modelos, al igual que en la bibliografía estudiada, es que esta validación por comparación presenta la dificultad de que aunque en ambos casos lo que se compara es la velocidad del viento superficial a 10 metros, no es realmente la misma magnitud, ya que en el caso de los modelos la magnitud que se obtiene representa la velocidad media de un área de unos 25 km², en el caso de los modelos de ESCENA, y un área de unos 12,5 km² para los modelos de EUROCORDEX, mientras que los valores recogidos por las estaciones meteorológicas corresponden a valores muy localizados, y el viento es una magnitud muy susceptible a los efectos locales.

Por lo que para poder comparar los resultados de los modelos con los valores medidos, primeramente lo que se hizo fue interpolar mediante medias ponderadas en función de la inversa de la distancia los cuatro valores de los RCMs más próximos espacialmente a la ubicación real de la estación, obteniendo para cada RCM una serie temporal de valores de velocidades de viento para cada ubicación de una estación meteorológica, siguiendo las ideas que [40] y [34], luego ya se tendrían magnitudes totalmente comparables.

Pero aunque ahora ya se tendrían magnitudes comparables, ya que tanto los resultados de los modelos como los de las estaciones meteorológicas están reducidos a series temporales de datos de velocidad del viento, se tiene que las de las estaciones meteorológicas recogerían los efectos locales sobre el viento, cosa que no ocurriría con las series temporales de los RCMs, ya que la discretización de los modelos no es lo suficientemente fina como para recoger los efectos de los accidentes orográficos menores de decenas de km². Por lo que para diluir los dichos efectos de los datos de las estaciones meteorológicas, lo que se hizo es agrupar las estaciones en zonas, y calcular para dicha zona la distribución de probabilidad de los vientos y su serie temporal mensual media, que es lo que se utilizará en esta tesis para evaluar mediante comparación la habilidad de los modelos para simular los vientos en

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

la Península Ibérica, al igual que [18], [24] y [34]. Además, el hecho de agrupar las estaciones meteorológicas en regiones que presentan un comportamiento temporal similar y estudiar esa región como un todo, mediante su distribución de probabilidad de velocidades y su serie temporal media, presenta otra ventaja adicional. Permite reducir los grados de libertad del problema, ya que los estadísticos de la región representan a la colectividad de todas las estaciones pertenecientes a esa región.

En muchos casos los resultados de los cambios climáticos regionales son presentados usando regiones con formas simples [28] y [41], o basadas en las formas de los tipos de clima [43]. Pero en realidad, las regiones con climas similares no tienen porque adoptar geometrías sencillas, y por otro lado, además cada variable climática suele presentar patrones de cambio diferentes al del clima, por lo que la forma de dicho patrón no tiene porque coincidir con la forma de un clima tipo para una región dada. Luego con el objeto de agrupar estaciones meteorológicas que presentan un comportamiento similar en el tiempo se utilizaron métodos de clustering o agrupamiento.

2.1 Técnicas de Clustering o Agrupamiento Analizadas para Estudiar la Evolución de los Vientos en la Península Ibérica e Islas Baleares

Las técnicas de agrupamiento son utilizadas con frecuencia para agrupar estaciones meteorológicas en regiones con climatologías parecidas basándose en parámetros meteorológicos [43], [44]. También son útiles para clasificar condiciones meteorológicas en diferentes regímenes sinópticos [45], particionar las regiones de estudio en distintas zonas climáticas [46]. También se pueden usar técnicas de agrupamiento para validar resultados de modelos paleoclimáticos [47] agrupando regiones que presentan los mismos patrones de cambio climático. De los trabajos de clasificación realizados en clima cabría destacar [48], porque su temática está totalmente relacionada con el objeto de esta tesis. En este trabajo se caracteriza la climatología de los vientos

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

superficiales de la Península Ibérica, y para simplificar esta caracterización se utilizan métodos de agrupamiento jerárquicos basados en la técnica de varianza mínima de Ward, obteniendo que los grupos encontrados se pueden relacionar con los principales accidentes orográficos de la Península Ibérica.

Por lo que a la vista de estos resultados, parece ser que el análisis por agrupamiento es una herramienta adecuada para dividir una zona de estudio en regiones más pequeñas de forma que estas regiones tengan significado desde el punto de vista climatológico y a su vez reducir el número de puntos a analizar sin perder información significativa, ya que cada uno de los puntos del grupo vendría representado por la estadística que representa al grupo, pudiendo reducir el número de objetos a analizar, pasando de miles de puntos a unos pocos grupos. Hay diversas técnicas de agrupamiento, en esta tesis se analizaron las siguientes con el objeto de determinar cuál es la que mejor se adapta a las necesidades de la tesis. K-means, agrupamiento jerárquico (varianza mínima de Ward), agrupamiento espectral, y métodos de agrupamiento basados en densidad (Dbscan), obteniéndose que la técnica que presenta los mejores resultados es K-means. Los resultados de dicho análisis se presentan en el Anexo I.

A continuación se describirán someramente los distintos algoritmos que se estudiaron:

K-means, Ref. [49] y Ref. [50]:

K-means es un método de clasificación basado en prototipos, que trata de encontrar dentro de una colectividad un número de clústeres (K) fijado previamente, donde cada grupo viene representado por su centroide. Que sea una metodología de clasificación basada en prototipos, lo que quiere decir es que un elemento pertenece a un grupo si dicho elemento está más próximo al prototipo que representa a ese grupo que a cualquier otro prototipo de cualquier otro grupo. Generalmente en K-means se utiliza como prototipo el centroide, es decir el promedio de todos los puntos del cluster.

El algoritmo en el que está basado K-means es relativamente sencillo:

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

- Primeramente se han de elegir el número de agrupamientos a realizar, generalmente este es un valor arbitrario ya que el número óptimo de clústeres es un dato desconocido.
- Una vez escogido el número de centroides, ya que este ha de coincidir con el número de agrupamientos, la elección de los centroides se hace de forma aleatoria ya que en muchos casos no hay un criterio a priori en el cual basarse.
- Una vez escogidos los centroides se comienza a agrupar los puntos alrededor de ellos de forma que se cumpla un criterio, el más usado comúnmente es, la distancia Euclídea que fue la que se usó en la tesis, aunque se pueden definir otras distancias. La forma para decidir si un punto pertenece a un grupo u a otro, es calcular la distancia con los centroides, representantes de dichos grupos, y con el centroide que le separa la distancia mínima es al grupo al que pertenece dicho punto. Como los puntos de la colectividad a clasificar son p-dimensionales, se define la distancia Euclídea como:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^p (x_i - y_i)^2}$$

- Realizando esto se obtiene un agrupamiento de los puntos a estudiar, pero no se tiene la garantía que el agrupamiento obtenido sea el que minimice la distancia de todos los puntos de la colectividad, de todos los agrupamientos posibles, ya que los agrupamientos son sensibles a la elección de los centroides. Luego se ha de repetir el proceso de elección de los centroides y se ha de calcular la distancia que separan los puntos de los grupos con su centroide de forma que si esta fuera menor que la de los casos anteriores, el nuevo agrupamiento sería más óptimo que los anteriores. Este proceso iterativo duraría hasta que se apreciara que la variación de los centroides semilla escogidos no produjeran agrupamientos que presentaran una distancia menor que el agrupamiento óptimo previamente obtenido. Esto conlleva el inconveniente de definir un criterio que indique cuando el proceso iterativo ha de terminar, en nuestro caso basándose en la velocidad del algoritmo

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

se fijó un número alto de iteraciones 250.000, con el objeto de asegurarse que la clasificación obtenida sea la óptima o próxima a ella.

El método K-means presenta una serie de problemas:

- El hecho de que los centroides semilla sean elegidos de forma aleatoria, hace que se tenga que utilizar la estrategia de iterar hasta que el agrupamiento óptimo no varíe. Esto no garantiza que la solución encontrada no sea más que un mínimo local y no global. Ya que generalmente no es computacionalmente abordable probar todos los agrupamientos posibles. Una forma de validar la solución aportada por K-means, es utilizar un criterio externo, es decir ver si los agrupamientos encontrados tienen sentido comparándolos con algo que sirva de norma, por ejemplo en nuestro caso se obtuvo que los clústeres obtenidos se puede relacionar fácilmente con los principales accidentes orográficos de la Península Ibérica. Aunque también hay otras técnicas para elegir los centroides semilla, como por ejemplo utilizar agrupamiento jerárquico para obtener un agrupamiento inicial y a partir de allí tomar los centroides semilla, aunque esto implica un aumento de coste computacional. Otra forma es partir de un centroide elegido de forma aleatoria y a partir de él elegir los demás de forma que el punto de la colectividad elegido como el siguiente centroide sea aquel que esté más distante de los centroides elegidos previamente.
- Otro de los problemas que presenta K-means, es que es susceptible a la presencia de “outliers” en la muestra de puntos a estudiar, la existencia de ruido, es decir de puntos que no corresponderían a la clase de los puntos pertenecientes a la muestra, hace que los centroides no sean tan representativos del grupo que representan ya que vendrían modificados por estos “outliers”. Una forma de evitar este efecto es filtrar los datos de forma que se eliminen los puntos erróneos. En lo que se refiere a los datos usados en esta tesis, se comprobó que todos los valores de ECA&D utilizados en el análisis correspondían a velocidades de viento en superficie y en los resultados de los RCMs se comprobó que no hubiese errores.

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

- Pero el gran problema que tiene K-means es la necesidad de proporcionarle por adelantado el número de clústeres en los que agrupar los distintos puntos de la colectividad. Una forma de tratar este problema es ir variando el número de clústeres de forma arbitraria, obteniendo diversos agrupamientos. Entonces, el agrupamiento óptimo sería el que minimizase las distancias entre los elementos de los grupos con su respectivo centroide, o lo que es lo mismo el agrupamiento que minimizase la desviación estándar media de todos los grupos, este agrupamiento sería el en el que cada punto es el representante de su propio grupo, pero esta solución no es válida ya que no proporciona ninguna información, actuando de esta forma no se estaría formando ningún grupo. Luego para calcular el número óptimo de clústeres se pueden adoptar distintas estrategias, pero una que se usa de forma bastante habitual sería el método del codo. Generalmente si se representa la desviación estándar media, o la distancia media, o el error medio,... de los puntos de los distintos grupos con sus respectivos centroides, para los distintos agrupamientos obtenidos respecto a distintos valores del número de clústeres, se suele obtener una gráfica del tipo que aparece en la Ilustración 1.

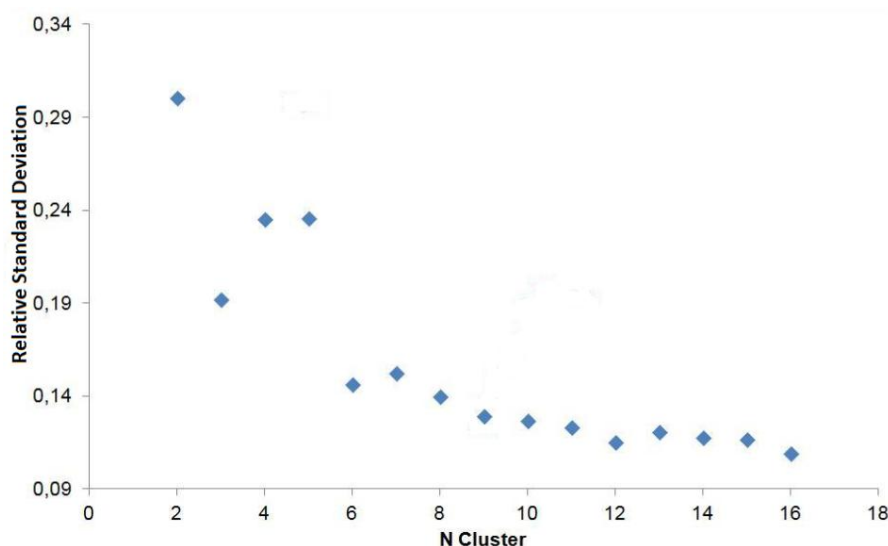


Ilustración 1: Representación gráfica típica de la distancia entre los distintos agrupamientos en función del número de clústeres objetivo. Ref. [51]

Si se estudia la Ilustración 1, se puede observar que hay un punto en el que a partir del cual incrementar el número de clústeres no implica una

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

mejora sustancial en la reducción de la desviación estándar, por lo que se suele escoger ese punto como el número óptimo de clústeres, porque ese punto permite reducir la desviación estándar media de los distintos grupos sin la necesidad de aumentar mucho el número de clústeres.

Para obtener cual es el punto donde se encuentra el codo hay diversas técnicas. Una de las más usadas se basa en darse cuenta que los puntos a la derecha y a la izquierda del codo se pueden ajustar por rectas.

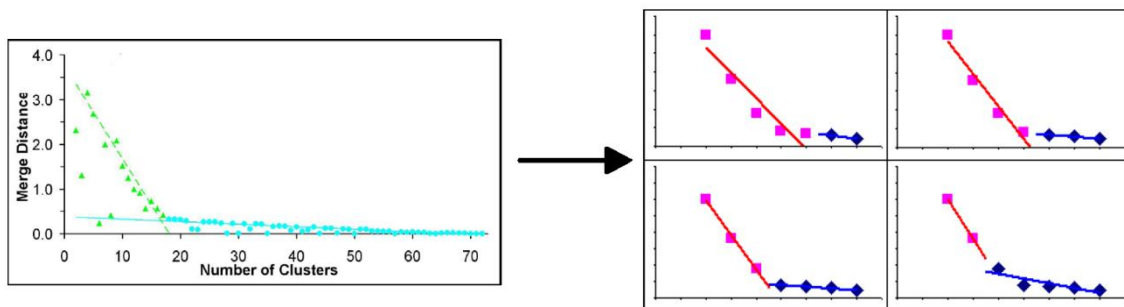


Ilustración 2: Determinación del número óptimo clústeres mediante el método L. Ref. [52].

Luego para determinar el codo lo que se hace es calcular para cada punto de la curva los errores cuadráticos medios resultantes de aproximar los puntos a la derecha y a la izquierda del punto por una recta, ponderar dichos errores por el número de puntos que tienen dichas rectas con respecto al total, y sumar dichos errores. El punto óptimo será el que presente un error más pequeño. Por ejemplo sea una curva donde el número de clústeres varía desde 2 hasta b , por lo que tiene $b-1$ puntos. Luego para el punto que representa c clústeres, se calcula el error cuadrático medio a la derecha y a la izquierda del punto, la parte a la izquierda del punto (L_c) tendrá $c-2$ puntos, y la parte derecha (R_c) tendrá $b-c$ puntos, luego el error cuadrático medio asociado al punto que representa el número de clústeres c vendrá dado por la ecuación:

$$RMSE_c = \frac{c-1}{b-1} \cdot RMSE(L_c) + \frac{b-c}{b-1} \cdot RMSE(R_c)$$

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

El punto del codo será aquel que tenga el RMSEc menor. Para calcular el codo hay otras técnicas, pero básicamente son modificaciones de la presentada. En esta tesis se usó una variante para calcular el número óptimo de clústeres para agrupar las estaciones meteorológicas de ECA&D, se calculó el coeficiente de correlación lineal R^2 a la derecha y a la izquierda de cada punto y se escogió el punto que presentó la media más alta.

Para calcular el número de clústeres óptimo en los que agrupar los resultados de los distintos RCMs, se desarrolló una técnica propia, este es uno de los resultados innovadores que se presenta en esta tesis. Dicha metodología se describe en el punto 3.4

Agrupamiento jerárquico (varianza mínima de Ward), Ref. [50]:

Otra técnica de agrupamiento que se analizó fue el agrupamiento jerárquico basado en la varianza mínima de Ward, aunque al final no se usó ya que presentó peores resultados que el K-means. Los métodos jerárquicos se pueden agrupar en dos grandes familias

- Técnicas aglomerativas: En estas técnicas se parte de que cada punto es su propio clúster, y empiezan agrupando los clústeres más próximos entre ellos, hasta que se alcanza un número de clústeres objetivo. Para usar estas técnicas se necesita definir el concepto distancia entre clústeres.
- Técnicas disociativas: En este caso se empieza con un único clúster que engloba todos los puntos de la colectividad, y esta se va partiendo formando nuevos clústeres hasta que se alcanza un número objetivo. Para poder usar estas técnicas, es necesario definir criterios que indiquen que clúster dividir y como hacer la partición.

Generalmente las técnicas de agrupamiento jerárquico se representan gráficamente mediante diagramas llamados dendrogramas.

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

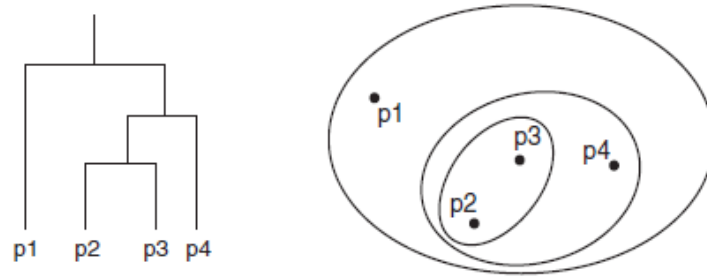


Ilustración 3: Izquierda, ejemplo de dendrograma. Derecha, ejemplo de anidamiento de clusters

El método de Ward, que fue la técnica aglomerativa que se empleó en esta tesis aunque al final se desecharon sus resultados frente a los dados por K-means, asume que cada clúster viene representado por su centroide, y define la proximidad entre dos clústeres en términos de incremento en la distancia que resulta de la unión de esos dos clústeres, el método de Ward tiene el mismo objetivo que K-means, minimizar la suma de la distancia de los puntos de cada grupo a sus respectivos centroides. Empleando esta técnica se obtuvieron resultados parecidos a los obtenidos con K-means, pero el número de puntos clasificados fue menor.

Métodos de agrupamiento basados en densidad (DBSCAN), Ref. [50]:

Los métodos de agrupamiento basados en densidad, son capaces de distinguir regiones que presentan distintas densidades, para ello es necesario definir el concepto de densidad, hay diversas definiciones pero la que se usó en esta tesis es la dada por el método DBSCAN. En el método DBSCAN, la función densidad para un punto determinado viene dada por el número de puntos dentro de un determinado radio Eps, centrado en el punto. Este concepto de densidad permite definir tres tipos de puntos:

- Puntos de core: Son aquellos puntos que tienen en su vecindad, la cual viene definida por un radio Eps, un número mínimo de puntos MinPts
- Puntos de borde: Son aquellos puntos que no pertenecen al core, ya que su número de vecinos es menor que MinPts, pero pertenecen a la vecindad de algún punto Core.
- Puntos ruido: Son aquellos puntos que no son puntos de core ni puntos de borde.

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

En la Ilustración 4 se representan los conceptos de punto de core, punto de borde y punto ruido:

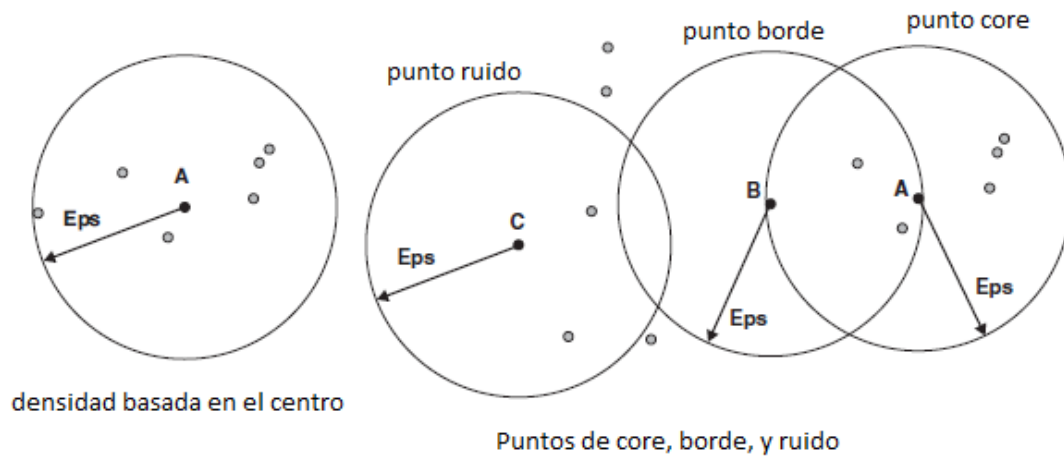


Ilustración 4: Conceptos de densidad basada en el centro, punto de core, punto de borde y punto ruido. Método DBSCAN

Según la Ilustración 4, si se considera que Eps es el radio que define la vecindad de un punto y $\text{MinPts} \geq 7$, el punto A es un punto del core, ya que tiene en su vecindad definida por el radio Eps 7 puntos, B es un punto del borde ya que no tiene en su vecindad 7 puntos pero si pertenece a la vecindad del punto A que es un punto del Core, el punto C es un punto ruido ya que ni tienen en su vecindad 7 puntos ni pertenece a la vecindad de algún punto del Core.

En general, los métodos basados en densidad y en particular el método DBSCAN, son poco adecuados para el tratamiento de datos climáticos, ya que presentan serias limitaciones a la hora de trabajar con datos multidimensionales [53], [54], [55] y [56], ya que la vecindad de un punto puede variar a lo largo de las distintas dimensiones, lo que implicaría que el concepto densidad estaría mal definido. Esto se comprobó en la tesis, obteniendo agrupamientos sin sentido.

Métodos de agrupamiento espectral, Ref. [57], Ref. [58] y Ref. [59]:

Los métodos de agrupamiento espectral pueden conseguir una clasificación correcta en casos en los que K-means no es capaz de hacerlo, siendo a la vez un algoritmo cuya implementación no es excesivamente compleja.

Pero para lograr esto los métodos de agrupamiento espectral no trabajan sobre el problema original, si no que implementa una serie de condiciones de

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

relajación para que la resolución del problema sea alcanzable, presentando los resultados finales una fuerte dependencia con la elección de los parámetros respecto a los datos.

Fundamentalmente la variación que presentan los métodos de agrupamiento espectral sobre el método K-means, es que trabajan sobre la noción de similitud entre pares de puntos. Es decir dado un conjunto de puntos x_1, \dots, x_n y un criterio de similitud entre pares de puntos $S_{ij} \geq 0$, el objetivo de los métodos de agrupamiento espectral, es la agrupación de puntos con una alta similitud separándolos de los otros puntos con los que presentan una similitud menor. Una forma bastante común de representar la similitud de una colectividad de puntos es mediante un gráfico de similitud $G=(V,E)$, donde V es el conjunto de vértices y E el conjunto de segmentos de unión entre vértices:

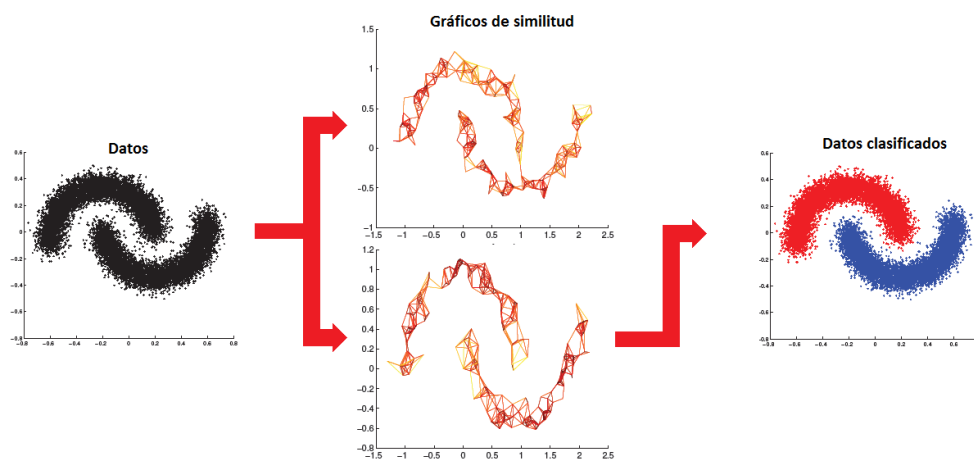


Ilustración 5: Distintos gráficos de similitud para un mismo conjunto de datos.

Una vez establecido el grafo $G=(V,E)$ usando los puntos de datos como vértices, es necesario pesar cada segmento de unión en función de algún criterio de similitud, $W_{ij}=S_{ij}$, obteniendo así el grafo de similitud. En la Ilustración 5 la similitud viene dada por el color del segmento. Pero como se puede apreciar en la Ilustración 5, el grafo de similitud va a tener una fuerte dependencia con el criterio de similitud usado. Esta fue la principal razón por la que se eligió utilizar en esta tesis el método K-means, ya que las clasificaciones obtenidas empleando el método espectral presentaban una fuerte dependencia con la parametrización del criterio de similitud utilizado. Además hay diversos de criterios de similitud, por ejemplo:

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

Grafo de vecindad- ϵ : conecta dos vértices v_i, v_j , si la distancia Euclídea (d_{ij}) entre dos vértices es menor que un ϵ dado, $d_{ij} < \epsilon$.

Grafo de k-vecinos cercanos: conecta dos vértices v_i, v_j si v_j está entre los k-vecinos cercanos de v_i o si v_i está entre los k-vecinos cercanos de v_j .

Grafo de k-vecinos mutuos cercanos: conecta dos vértices v_i, v_j si v_j está ente los k-vecinos cercanos de v_i y si v_i está entre los k-vecinos cercanos de v_j .

Grafo totalmente conectado: conecta dos vértices v_i, v_j si $S_{ij} > 0$ y los pesos W_{ij} , se asignan en función de S_{ij} . Donde S_{ij} , puede a su vez aceptar diferentes definiciones, por ejemplo se puede usar como criterio de similitud la gaussiana:

$$S_{ij} := e^{-\frac{d(x_i, x_j)^2}{2\sigma^2}}$$

Donde $d(x_i, x_j)$ es la distancia Euclídea y σ es el parámetro que define el tamaño de la vecindad. Otro criterio usado bastante frecuentemente para definir la similitud puede ser la distancia inversa:

$$S_{ij} = \frac{1}{1 + d(x_i, x_j)^2}$$

Donde $d(x_i, x_j)$ es la distancia Euclídea.

Una vez obtenida la matriz de similitudes de los n puntos, para realizar la clasificación de estos se pueden aplicar diversos métodos de agrupamiento espectral. Generalmente las diferencias entre los diversos métodos se basan en la forma en la que se trata la matriz Laplaciana (L) y/o la matriz de sus autovalores. Por ejemplo hay diversas formas de normalizar la matriz Laplaciana:

- No normalizada:

$$L = D - W$$

- Simétrica:

$$L_{sim} = D^{-1/2} L D^{-1/2}$$

Capítulo 2: Problemática para la Regionalización Eólica de una Zona

- Random walk:

$$L_{rw} = D^{-1}L$$

Donde D es una matriz diagonal que se forma poniendo en cada posición de la diagonal el número de segmentos que llegan al vértice correspondiente del grafo y W es la matriz de pesos que guarda la información de la similitud entre vértices.

Una vez obtenida la matriz Laplaciana se calculan los k vectores propios de la matriz Laplaciana y se forma la matriz de los vectores propios, la cual se puede formar de diversas formas. Una vez formada la matriz de vectores propios se le aplica algún método de clasificación para obtener los grupos, generalmente K-means.

Capítulo 3.

Caracterización de los Vientos de Superficie de la Península Ibérica e Islas Baleares.

La gran variedad topográfica que presenta la Península Ibérica y su posición geográfica hace que esta presente una gran diversidad climatológica, [60]. La Península Ibérica está bajo la influencia tanto de masas de aire de origen continental como marítimo, y la interacción de dichas masa de aire con la orografía produce la aparición de diversos regímenes de viento sobre la superficie de la Península Ibérica e Islas Baleares.

3.1 Orografía y posición geográfica de la Península Ibérica e Islas Baleares

La Península Ibérica está ubicada en latitudes medias entre los 36° y los 44° Norte, entre dos mares que presentan dinámicas y comportamientos térmicos diferentes, en el Norte y Oeste se encontraría el Océano Atlántico y al este el mar Mediterráneo. A su vez, el clima del Sur de la Península Ibérica vendría muy influenciado por la proximidad del desierto del Sahara y el continente africano del cual está solamente separado por el estrecho de Gibraltar, una franja de mar de unos 14,4 Km de ancho en su parte más angosta.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

Por otro lado, la Península Ibérica presenta una gran variedad de accidentes orográficos, con una altitud media de 650m, la segunda más alta de los países del continente europeo después de Suiza. La Península Ibérica se puede considerar que fundamentalmente está formada por una gran meseta, dividida en dos submesetas, una norte y otra sur, por el Sistema Montañoso Central. A su vez dicha Meseta Central está rodeada en sus bordes por diversos sistemas montañosos, excepto en la parte de Portugal donde la orografía se suaviza. Así en el Noroeste se encontraría el Macizo Galaico-Portugués, al norte la Cordillera Cantábrica y los Montes Vascos, al Noreste el Sistema Ibérico y al Sur estaría Sierra Morena. Al Este de esta gran meseta central estaría el valle del río Ebro encajonado al Norte por la Cordillera Pirenaica, al Este por la Cordillera Costera Catalana y al Oeste por el Sistema Ibérico. Al Sur de la Meseta Central estaría el valle del río Guadalquivir que estaría rodeado al Norte por la Sierra Morena y al Este y Sur por el Sistema Montañoso Bético. Esta topografía peninsular es un factor determinante en la configuración del clima ibérico, actuando sobre las masas de aire de forma clara. Así por ejemplo, según [60] la orientación Oeste-Este que presenta gran parte de los sistemas montañosos de la Península Ibérica (Pirineos, Cordillera Cantábrica, Sistema Central, Montes de Toledo, Sierra Morena y el Sistema Montañoso Bético) favorece la entrada del viento proveniente del Océano Atlántico al interior de la Península Ibérica, bloqueando la entrada del aire proveniente del Norte, Noreste, excepto el Sistema Ibérico que tiene una orientación Noroeste – Sureste.

Por su parte la Islas Baleares es un conjunto de islas en el mar Mediterráneo occidental situado al Este de la Península Ibérica, compuesto por cinco islas principales, Mallorca (3.460 km^2), Menorca (702 km^2), Ibiza (541 km^2), Formentera (82 km^2), Cabrera (16 km^2) y otras islas menores que cubren una superficie de 33 km^2 . Solamente Mallorca la mayor isla de archipiélago situada a unos 160 km de la Península Ibérica presenta cierta complejidad orográfica con cumbres que superan los 1000 m al norte de la isla.

3.2 Efectos de la Circulación General de la Atmósfera en el Clima de la Península.

Según [62], el clima de la Península Ibérica, se puede considerar templado, el cual viene determinado principalmente por su latitud geográfica y por el hecho de estar bañada por aguas relativamente calientes. Pero la variación cíclica anual, debida a las estaciones astronómicas, que afecta a la circulación general de la atmósfera, da lugar a que la Península Ibérica se pueda dividir en dos grandes zonas climáticas claramente diferenciadas: una prácticamente limitada a Galicia y a las regiones cantábrica y pirenaica, que queda fuera de la acción directa de las altas presiones subtropicales todo el año, y otra zona mucho más amplia que correspondería al resto de la Península bajo el efecto directo de estas durante el periodo estival.

Lo que origina, que la zona Norte esté afectada durante todo el año por los vientos generales del Oeste y por las perturbaciones originadas a lo largo del frente polar, lo que hace que esa zona presente un clima propio de la Europa occidental (inviernos suaves, veranos frescos, aire húmedo, abundante nubosidad y lluvias frecuentes). Mientras que para el resto de la Península, la diferencia en las condiciones de la circulación general entre el invierno y el verano, hace que tenga un clima predominantemente mediterráneo (inviernos suaves en la costa y severos en el interior, con veranos calurosos y secos, lluvias muy irregulares en otoño, invierno y primavera y abundante insolación todo el año.

Este comportamiento de las altas presiones tropicales que regulan en gran medida el clima en la Península Ibérica, viene mayormente gobernado por la llamada oscilación del Atlántico Norte o NAO (North Atlantic Oscillation), la cual viene dada por la diferencia entre la presión normalizada al nivel del mar en Gibraltar y la presión normalizada al nivel del mar en el sur de Islandia. El desplazamiento del centro subtropical semi-permanente de altas presiones de las azores, gobernado por la NAO, favorece a incrementar el efecto estacional del tiempo climático. Así en invierno, el centro de altas presiones se desplaza hacia latitudes más bajas lo que favorece la entrada de aire proveniente del Oeste combinada con la acción de perturbaciones originadas por el frente

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

polar. En verano, el centro de altas presiones se desplaza hacia latitudes más altas, bloqueando la entrada de vientos desde el Oeste de la Península Ibérica excepto en la región norte de la Península.

La localización y la intensidad del centro de altas presiones de las azores, regulan en gran medida los vientos que penetran en la Península Ibérica [60]. De acuerdo con [62], las principales masas de aire que afectan a la Península Ibérica, entendiendo masa de aire como “una amplia célula atmosférica aproximadamente homogénea en sentido horizontal” [63], se pueden clasificar en dos grandes tipos templadas y frías. Las cuales a su vez se subdividen entre marítimas y continentales. Así en [62] se enumeran las siguientes:

- Masa marítima polar (mP), tiene su origen en Groenlandia y el Norte de Portugal, se suele presentar en invierno aunque puede visitar la Península Ibérica en cualquier época del año.
- Masa marítima ártica (mA), se presenta prácticamente solo en invierno y al principio de la primavera, con características similares a la marítima polar solo que más fría y menos húmeda, tiene su origen en el Océano Ártico.
- Masa continental polar (cP), es característica del invierno tiene su origen en el anticiclón ruso siberiano, siendo normalmente muy fría y seca.
- Masa marítima tropical (mT), tiene su origen en el Atlántico. Dentro de la marítima tropical [62], considera conveniente subdividirla en marítima tropical cuando su componente principal tiene dirección sur, y marítima subtropical (mT sub) cuando los vientos tienen componente Norte u Oeste. Esta subdivisión se debe a que aunque ambas masas de aires tienen temperaturas y un contenido de humedad parecido, la orografía de la Península Ibérica hace que puedan dar clases de tiempo muy distintas, es decir en la Península Ibérica hay zonas debido a su orografía que su climatología tiene una fuerte dependencia con la dirección del viento. La masa marítima tropical es característica del otoño e invierno y ocasionalmente aparece en primavera, mientras que marítima subtropical está presente todo el año aunque es característica del verano.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

- Masa continental tropical (cT), tiene su origen en el Norte de África, puede aparecer en cualquier época del año, pero es en verano cuando se presenta mejor definida por su gran sequedad, alta temperatura y calma. El resto del año las masas de aire proveniente del Norte de África suelen tener su origen en el Atlántico y su paso por el continente africano no ha durado lo suficiente como para adquirir el carácter continental. Otro factor a tener en cuenta es el tiempo que la cT ha permanecido en el mediterráneo, ya que en función de esto puede variar su concentración de vapor de agua, y si este enriquecimiento es importante empieza a ser lícito considerarla como masa mediterránea.

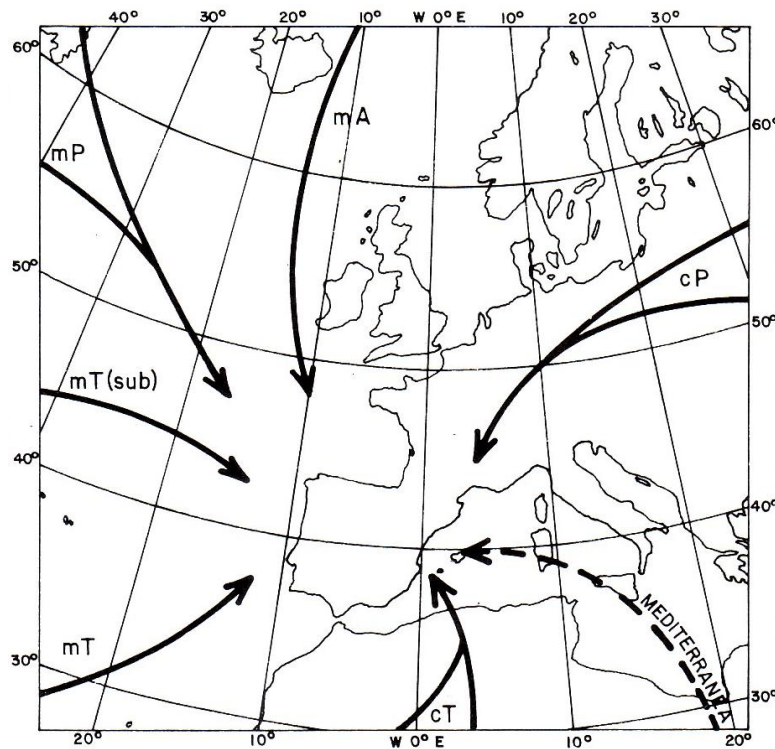


Ilustración 6: Trayectorias de las masas de aire que llegan a la Península.
Ref.: [62].

La interacción de estas masas de aire con la orografía de la Península Ibérica hace, según [64], que los vientos primarios considerados en su promedio anual sean: en la vertiente occidental atlántica vientos de componente Oeste; mientras en el interior dominan los vientos del Nordeste y del Sudoeste; en el litoral Mediterráneo rigen los vientos del Este, y la pareja Norte-Sur, aunque hacia el estrecho, también aparecerían vientos de procedencia Oeste.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

Estas direcciones predominantes vienen influenciadas por la estacionalidad. Durante el invierno, la posición anticiclónica prevalece favoreciendo el flujo del aire del interior de la Península hacia los mares circundantes. Mientras, en el verano el proceso es el opuesto, hay una depresión térmica interior que favorece la entrada de aire a la Península desde los mares circundantes.

Así estas masas de aire descritas anteriormente, junto con la orografía de la Península Ibérica y los mecanismos que rigen los vientos, dan lugar a una gran diversidad de tipos de vientos con nombre propio, nombre dado por los habitantes de la Península Ibérica, tratando de indicar con el nombre en muchos de los casos los fenómenos asociados a ellos, cambios en la temperatura, lluvias, tormentas,... Entre muchos de los vientos existentes con nombre propio se podrían destacar los siguientes:

- Abrego: Viento templado y húmedo del Suroeste de ambas Castillas, Extremadura y Andalucía con temporal de lluvia.
- Bochorno: Viento del Sureste de procedencia mediterránea, que entra por la desembocadura del Ebro y sube río arriba, llevando el temporal de lluvia a las cuencas baja y media.
- Cierzo: Viento frío y seco que sopla con frecuencia en el valle del Ebro.
- Galerna: Cizalla de viento en superficie con brusco y acusado salto del Suroeste al Noroeste típico del golfo de Vizcaya y la costa cantábrica, acompañado de intenso temporal en el mar.
- Jaloque: Viento cálido del Sureste procedente del Sáhara, que se carga de humedad al atravesar el Mediterráneo.
- Levante: Viento persistente algo húmedo y racheado que sopla en el estrecho de Gibraltar y Mar de Alborán y Murcia. Viento originado por el acanalamiento que producen la Sierra Nevada y la Cordillera del Atlas forzando el flujo del aire hacia el estrecho de Gibraltar.
- Leveche: Viento del Sureste que sopla en las costas de Murcia y Alicante, que puede transportar arena del desierto del Sáhara.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

- Nortadas: Vientos del Norte y Noroeste que soplan en la costa Oeste de Portugal.
- Poniente: Viento húmedo y templado del Oeste que entra por las costas portuguesas y arrastra borrascas atlánticas al interior de la Península.
- Tramontana: Viento frío y turbulento del Noreste o Norte, que en la Península Ibérica sopla sobre las costas de Cataluña y del archipiélago balear. Usa los Pirineos y el Macizo Central francés como zona de aceleración.
- Vendaval: Viento racheado, ocasionalmente huracanado y algo húmedo del Valle del Guadalquivir.

Además de los vientos originados por las circulaciones generales del aire más o menos moduladas por los accidentes orográficos, también existen vientos debidos a fenómenos propiamente locales que reciben nombre propio, como pueden ser:

- Solano: Viento del Este, de carácter terral típico de La Mancha y Extremadura, provocado en verano por la fuerte radiación solar incidente.

En lo que respecta a las Islas Baleares, el régimen climático, según [62], de estas viene gobernado por los mismos mecanismos que rigen la Península Ibérica. Así en invierno viene dominado por los vientos generales del Oeste en altura, y en verano por el anticiclón de las Azores. Sólo que modulado por la configuración geográfica propia de la zona de las Islas Baleares. La cuenca del Mediterráneo Occidental, está rodeada por auténticas barreras orográficas por el norte, oeste y sur (Alpes, Macizo Central francés, sistemas orográficos peninsulares y el Atlas) y más abierta por el Este. Los pasillos que definen estas barreras hacen que la toponimia de los vientos en las islas Baleares abarque toda la rosa de vientos y que esta sea esencialmente marinera.



Ilustración 7: Principales accidentes orográficos de la Península Ibérica, junto algunos de los vientos con nombre propio de la Península Ibérica.

3.3 Estudio de la Capacidad de los RCMs Usados en Esta Tesis Para Simular los Vientos de la Península Ibérica e Islas Baleares.

Tal y como se puede apreciar en los puntos 3.1 y 3.2, la Península Ibérica es una zona en la que la confluencia de masas de aire con distintas propiedades y una orografía complicada da lugar a un número importante de vientos. Por lo que antes de estudiar los vientos de la Península Ibérica como su evolución, se va a tratar de medir la capacidad de los RCMs utilizados en esta tesis para simular los vientos en la Península Ibérica e Islas Baleares. Para realizar tal cometido, tal y como se explica de forma detallada en el Capítulo 2, lo que se hizo fue comparar los resultados de RCMs del proyecto ESCENA (PROMES, MM5, REMO y WRF) y del proyecto EUROCORDEX (RACMO22E, HIRHAM5, CCLM4, RCA4 y WRF331F) forzados por la base de datos de reanálisis ERA-Interim con los datos recogidos por las estaciones meteorológicas de ECA&D

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

para el periodo de 1989 a 2008. Previamente a la comparación, los resultados de ECA&D fueron filtrados de forma que sólo se utilizaron los datos de aquellas estaciones que tenían un número de valores anómalos inferior al 10% del total para el periodo 1983-2013.

Pero tal como se explica en el Capítulo 2, no se puede comparar directamente los resultados de los RCMs con los datos de las estaciones meteorológicas. Ya que aunque tanto en el caso de los RCMs como en el de las estaciones meteorológicas de ECA&D, la variable medida es la velocidad del viento a 10 m de superficie, en el caso de las estaciones es un valor local, del punto donde está colocada la estación, mientras que para los modelos el valor corresponde a la velocidad media de un área de unas pocas decenas de kilómetros cuadrados. Por lo que para poder comparar ambas magnitudes se dieron dos pasos:

- Primero: se interpoló mediante medias ponderadas con la distancia los valores de los cuatro puntos del grid de los RCMs más próximos geográficamente a cada estación, obteniendo por estación meteorológica y RCM una serie temporal.
- Segundo: como las series temporales de las estaciones meteorológicas estarían afectadas por fenómenos locales, cosa que no ocurriría con la de los RCMs, y además se tendrían 71 series una por estación. Se decidió agrupar las estaciones en regiones que presentaran el comportamiento temporal más parecido desde el punto de vista eólico. Para lo cual se utilizó el método K-means debido a que fue el método que presentó mejor resultados cuando se utilizó para encontrar las regiones eólicas de la Península Ibérica usando los resultados de los RCMs.

Para obtener esta regionalización no se aplicó directamente el método K-means sobre los datos de las 71 estaciones meteorológicas de ECA&D. Previamente, a los datos de las estaciones meteorológicas se aplicó la técnica de análisis de componentes principales (PCA – Principal Component Analysis), ya que según [65] los datos de viento de estaciones meteorológicas pueden presentar una heterogeneidad alta, lo que puede hacer que el método K-

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

means converja en mínimos locales sin significado. Para evitar esto en [65] se propone aplicar PCA normalizado antes de emplear K-means sobre los datos de las estaciones meteorológicas. Además sabiendo que según [66] el análisis de componentes principales es probablemente la técnica de análisis multivariable más antigua y más estudiada, introducida por Pearson en (1901), y desarrollada por Hotelling de forma independiente en (1933), que tiene como objetivo reducir las dimensiones de un conjunto grande de variables interrelacionadas, manteniendo tanto como sea posible la variabilidad presente en dicho conjunto de datos, se puede ver que PCA es una técnica que se adecua muy bien al objetivo de encontrar las estaciones meteorológicas con un comportamiento parecido. Para hacer esto PCA transforma el conjunto inicial de datos en un nuevo conjunto, formado por las Componentes Principales del primero, de forma que las primeras componentes principales (PC - Principal Components) conservan la mayor parte de la varianza del primer conjunto de datos, por lo que solamente es necesario escoger las primeras PC para conservar prácticamente toda la varianza del primer conjunto de datos, lo que permite reducir las dimensiones del conjunto de datos a tratar sin perder la información crucial, además eliminar variables con apenas significado que se pueden identificar con ruido. Además, teniendo en cuenta que según [67], la reducción de dimensiones que la técnica de componentes principales efectúa está realizando una clasificación acorde con la función objetivo de K-means y que según [68] la solución global de los centroides de K-means residen en el subespacio de las componentes principales, se tiene que aplicar K-means al subespacio formado por las componentes principales obtenidas a partir del PCA es más eficiente y efectivo que aplicarlo a todo el conjunto de datos. En nuestro caso sólo fueron necesario escoger la 15 primeras PC para conservar una varianza mayor del 90%.

Una vez transformado el conjunto inicial de datos de las series temporales velocidades de viento diario de las 71 estaciones de ECA&D clasificadas en el nuevo conjunto formado por las 15 primeras componentes principales del conjunto original, se le aplicó K-means. Pero como a priori no se conoce el número óptimo de clústeres, se fue variando este entre 1 y 16 y calculando la desviación estándar relativa media (RSD – Relative Standard Deviation) para

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

cada clasificación. La definición de RSD es un desarrollo propio de la Tesis, la cual viene definida por la siguiente fórmula:

$$RSD = \frac{SD_1 - SD_N}{N - 1}$$

Donde:

- N es el número de clústeres
- SD_1 : es la desviación estándar del caso en el que todos los puntos están clasificados en el mismo grupo. Se toma como referencia ya que es el peor caso.
- SD_N : se obtiene calculando la media de la desviación estándar de todos los N clústeres.

RSD pretende medir la variación en la desviación estándar media por cada incremento en el número de clústeres. Realizando estos cálculos se obtuvo el siguiente resultado.

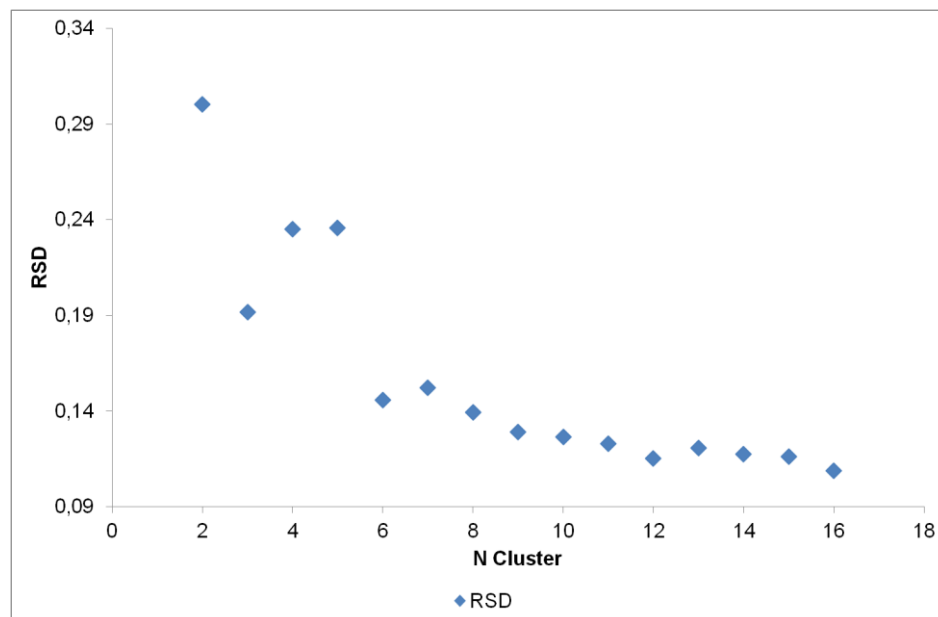


Ilustración 8: Desviación estándar relativa media en función del número de clústeres para los datos de viento superficial de ECA&D.

Una vez representado la desviación estándar media en función del número de clústeres para los datos de viento superficial de ECA&D, se trató de obtener el número óptimo de clústeres para lo que se usó el criterio del codo. Para ello se calculó el coeficiente de correlación lineal R^2 a la derecha y a la izquierda de

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

cada punto y se calculo el promedio para cada punto obteniendo la **¡Error! No e encuentra el origen de la referencia..**

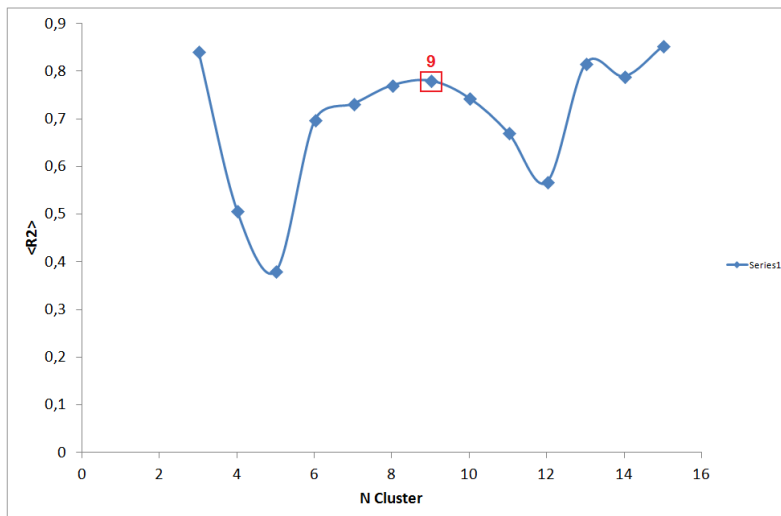


Ilustración 9: Coeficiente de correlación lineal promedio R2 para cada número de clúster Escogiéndose como número óptimo de clústeres 9, ya que es el que presentaba un coeficiente de correlación lineal R2 promedio más alto en la zona del codo de la Ilustración 8. Haciendo esto se obtuvieron los siguientes agrupamientos para las estaciones meteorológicas de ECA&D para Península Ibérica e Islas Baleares.

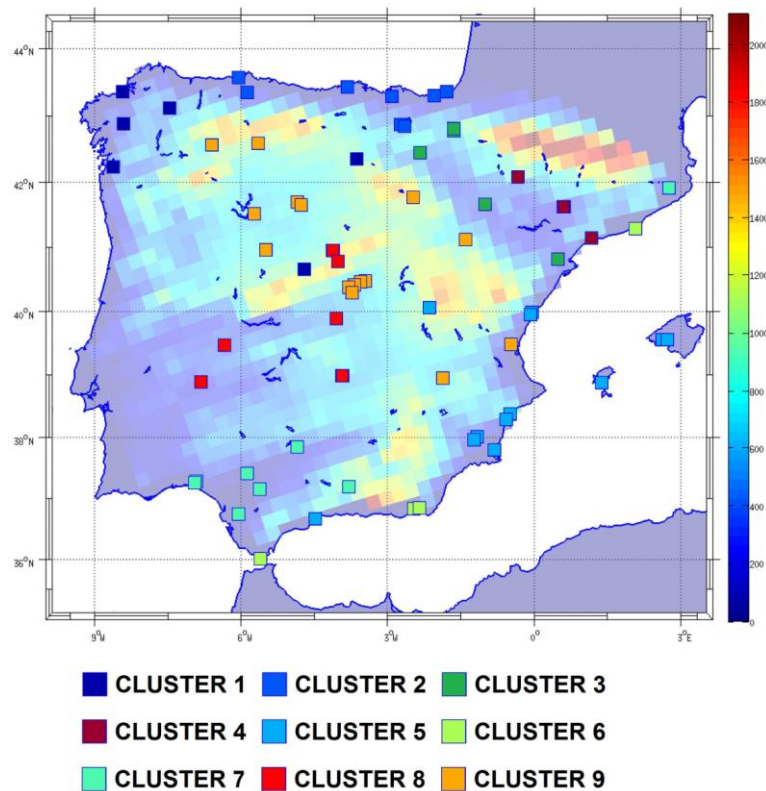


Ilustración 10: Agrupamientos de las estaciones meteorológicas de ECA&D, para nueve clústeres.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

Una vez agrupadas las estaciones meteorológicas que presentan una evolución más próxima entre ellas en nueve clústeres. Se está en disposición de evaluar la habilidad que tienen los RCMs forzados por ERA-Interim de los proyectos ESCENA y EUROCORDEX para simular el comportamiento eólico de esas zonas. Para ello, tal como se comentó antes, se obtuvo para cada ubicación de cada estación meteorológica y por RCM una serie temporal diaria de las velocidades del viento, para lo cual se interpoló en función de la inversa de la distancia las series temporales de velocidades del viento de los cuatro primeros vecinos del mallado de los RCMs a la ubicación de la estación meteorológica. Posteriormente y para amortiguar los efectos locales sobre las series temporales de las estaciones meteorológicas de ECA&D, se obtuvo para cada clúster de la Ilustración 10 una serie temporal diaria de las velocidades del viento, para lo cual se realizó la media de todas las series pertenecientes a cada clúster tanto para los datos de ECA&D como para las de los modelos.

Una vez obtenida una serie temporal diaria para cada clúster de la Ilustración 10 para ECA&D y para cada uno de los RCMs evaluados de los proyectos ESCENA y EUROCORDEX, se estuvo en disposición de evaluar la habilidad de los modelos para simular el viento a 10m de altitud para la Península Ibérica e Islas Baleares. Para lo cual se estudió la correlación entre las series temporales mensuales de las velocidades del viento para ECA&D y las de los RCMs y también se compararon las distribuciones de probabilidad de las velocidades del viento de ECA&D y las de los modelos para cada clúster, para hacer esa comparación se utilizó el criterio de Perkins o Perkins' Skill Score (S_{score}). El criterio de Perkins calcula el área que tienen en común dos distribuciones de probabilidad dadas, de forma que si dos funciones de distribución de probabilidades (Probability Distribution Function – PDF) son totalmente coincidentes el S_{score} tomaría un valor igual a uno. El S_{score} vendría definido por la siguiente expresión.

$$S_{score} = \sum_{1}^n \text{minimum}(Z_m, Z_0)$$

donde n es el número de casillas en que se divide el eje de velocidades del viento de la distribución, Z_m es la probabilidad de que la velocidad del viento de

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

un RCM esté en una casilla determinada de velocidades del viento y Z_0 es la probabilidad de que la velocidad del viento de ECA&D esté en la misma casilla que la del RCM.

Luego calculando el coeficiente de correlación entre las series temporales mensuales de las velocidades del viento a 10 m de los clústeres de la Ilustración 10 para ECA&D y para los RCMs forzados por ERA-Interim tanto del proyecto ESCENA como del proyecto EUROCORDEX se obtuvo la Tabla 2 y la Tabla 3.

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	media
CCLM4	0,65	0,67	0,75	0,79	0,36	0,50	0,66	0,61	0,79	0,64
IPSL	0,52	0,64	0,36	0,47	0,19	0,46	0,43	0,48	0,58	0,46
HIRHAM5	0,63	0,64	0,57	0,69	0,30	0,54	0,59	0,53	0,74	0,58
RACMO22E	0,66	0,66	0,65	0,69	0,44	0,55	0,56	0,56	0,70	0,61
RCA4	0,55	0,65	0,52	0,67	0,38	0,57	0,49	0,54	0,68	0,56
media	0,60	0,65	0,57	0,66	0,33	0,52	0,55	0,54	0,70	0,57

Tabla 2: Coeficiente de correlación entre las series temporales mensuales de las velocidades del viento a 10 m de los clústeres de la Ilustración 10 para los RCMs de EUROCORDEX forzados por ERA-Interim y para ECA&D durante el periodo 1989-2008. Las correlaciones con un nivel de confianza mayor o igual al 95% están resaltadas en negrita.

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	media
REMO	0,58	0,67	0,56	0,70	0,38	0,57	0,44	0,55	0,72	0,57
PROMES	0,58	0,69	0,58	0,75	0,44	0,56	0,41	0,55	0,74	0,59
MM5	0,54	0,67	0,39	0,63	0,47	0,56	0,27	0,51	0,68	0,52
WRFB	0,50	0,67	0,46	0,71	0,40	0,56	0,34	0,52	0,70	0,54
media	0,55	0,68	0,50	0,70	0,42	0,56	0,37	0,53	0,71	0,56

Tabla 3: Coeficiente de correlación entre las series temporales mensuales de las velocidades del viento a 10 m de los clústeres de la Ilustración 10 para los RCMs de ESCENA forzados por ERA-Interim y para ECA&D durante el periodo 1989-2008. Las correlaciones con un nivel de confianza mayor o igual al 95% están resaltadas en negrita.

Si se analiza la Tabla 2 y la Tabla 3, se puede ver que en la mayor parte de los casos la correlación muestra valores superiores a 0,5 con un nivel de confianza siempre superior al 95%, valores razonables desde el punto de vista eólico. El hecho de que de media el valor que toma la correlación para los modelos de ESCENA y EUROCORDEX con los datos de ECA&D es 0,56 para los primeros y 0,57 para los segundos, indica en la mayor parte del tiempo hay correlación entre las series de ECA&D y la de los modelos, aunque también es interesante

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

observar que de media apenas hay diferencia entre los resultados de los modelos de ESCENA y de EUROCORDEX aunque la resolución de los modelos de EUROCORDEX dobla a los de ESCENA.

Por otro lado, los resultados de la Tabla 2 y de la Tabla 3 también permiten encontrar los clústeres para los que los modelos tienen más problemas para simular la tendencia de la serie temporal de los vientos, así los clústeres que tiene una correlación más baja son el 5 y el 7, que corresponden con la zona mediterránea y el valle del Guadalquivir, para estos clústeres en muchos casos la correlación entre las series de los modelos y las de ECA&D es inferior a 0,5.

Pero el análisis por correlación se revela insuficiente para evaluar las capacidades de los modelos para simular los vientos de la Península Ibérica, ya que este análisis no permite revelar sesgos o tendencias en la velocidad media de los vientos. Por lo que para evaluar la capacidad que los RCMs tienen para simular el comportamiento de los vientos en la Península Ibérica, se decidió estudiar las PDFs de cada clúster para los RCMs y ECA&D, ya que la función de densidad de probabilidad de las velocidades de viento de una zona contiene toda la información que caracteriza esa zona desde el punto de vista del potencial eólico, por lo que el análisis de las distribuciones de las velocidades del viento permitirá revelar más información que un análisis de las velocidades medias o de las desviaciones estándar.

Luego para realizar esto, se calcularon las funciones de distribución de probabilidad de la velocidad del viento para cada uno de los clústeres de la Ilustración 10, para lo cual se usaron las series temporales diarias medias para el periodo 1989-2008 de cada uno de los clústeres, esto se hizo tanto para ECA&D como para los RCMs de los proyectos ESCENA y EUROCORDEX forzados por ERA-Interim, obteniéndose la Ilustración 11 y la Ilustración 12.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

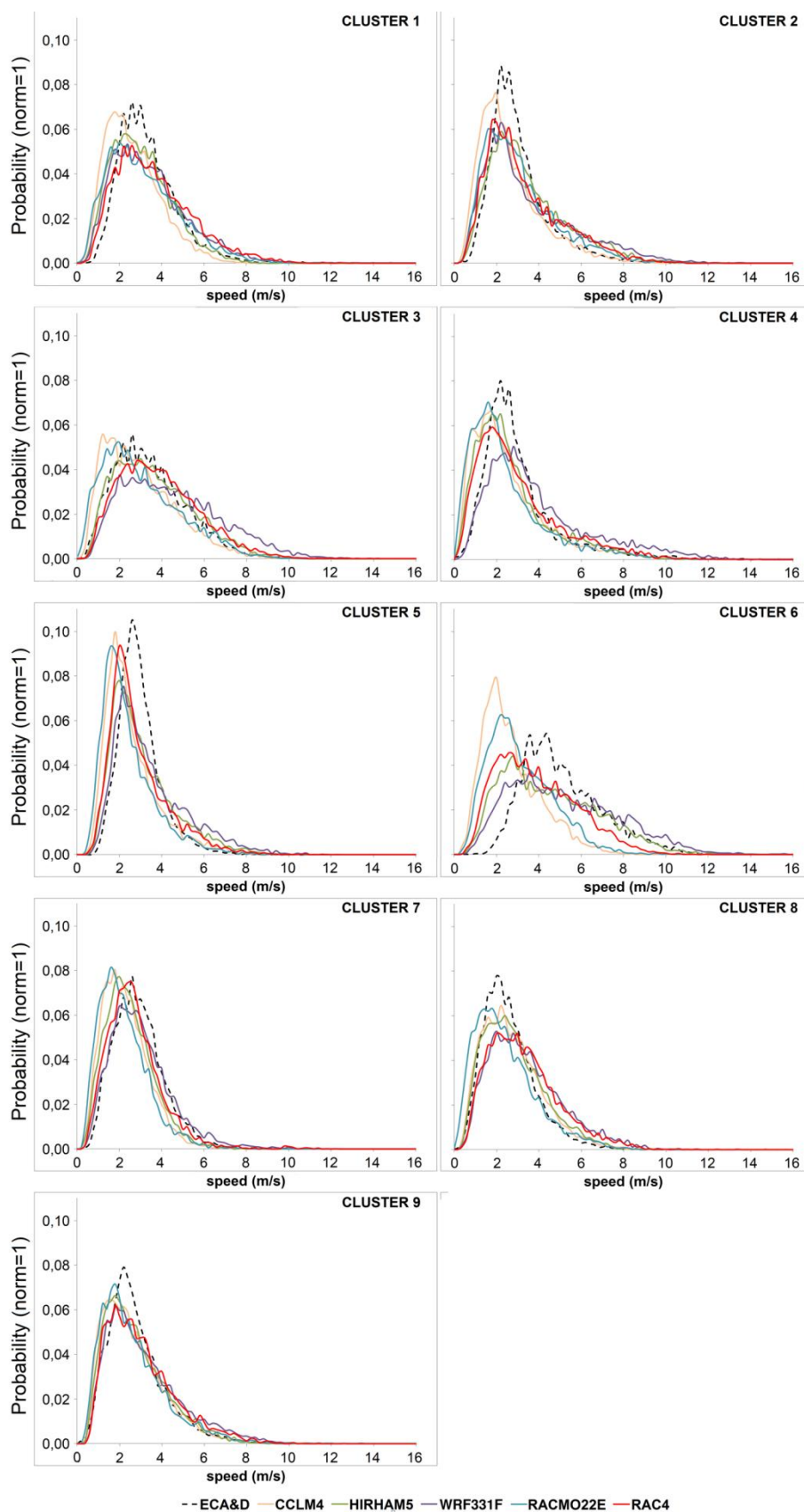


Ilustración 11: Funciones de Distribución de Probabilidad de la velocidad del viento diario superficial para ECA&D y RCMs forzados por ERA-Interim para el periodo 1989-2008. Proyecto EUROCORDEX.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

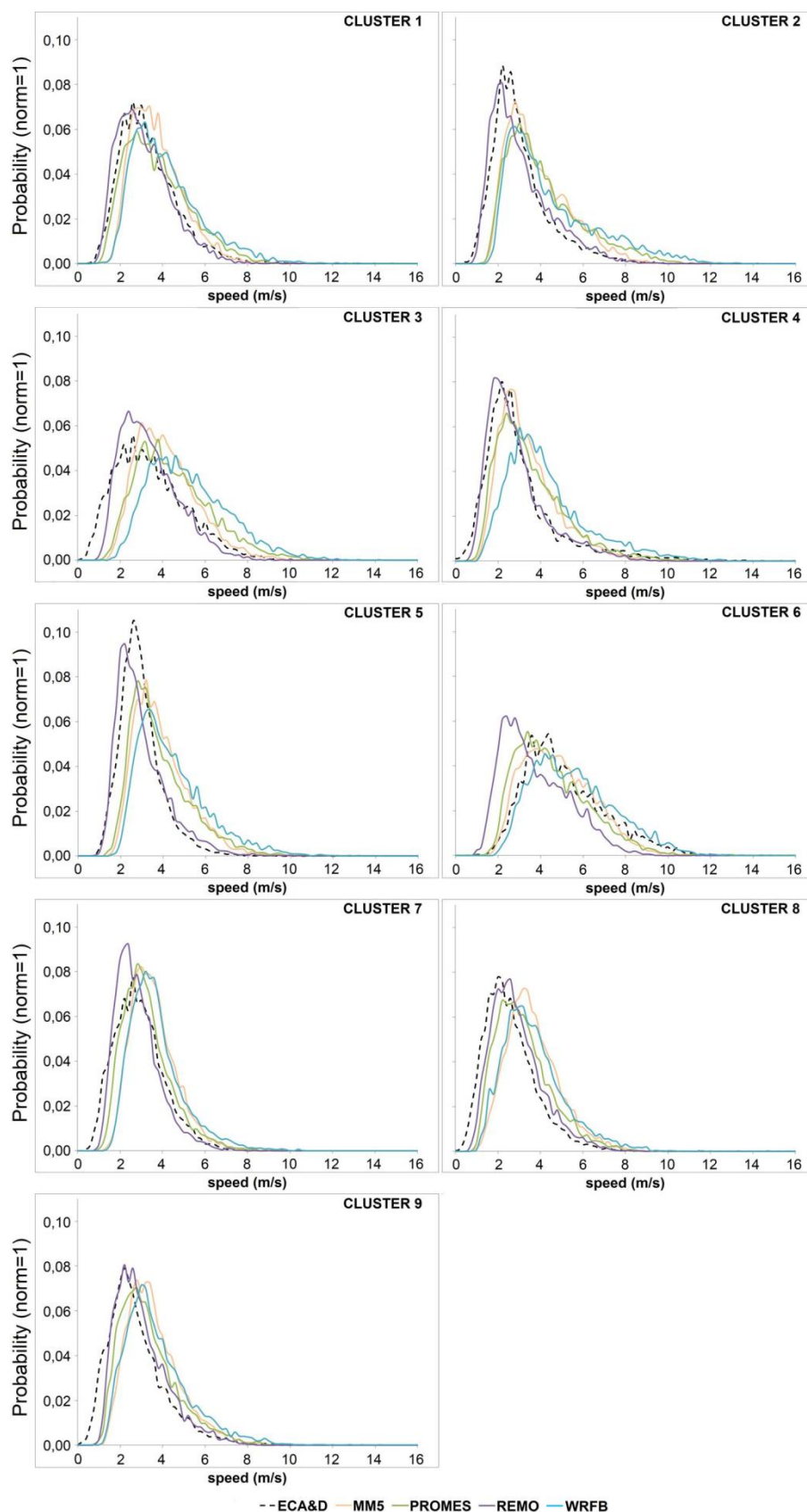


Ilustración 12: Funciones de Distribución de Probabilidad de la velocidad del viento diario superficial para ECA&D y RCMs forzados por ERA-Interim para el periodo 1989-2008. Proyecto ESCENA.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

Una vez obtenidas las PDFs, para comparar las de los RCMs con las de ECA&D se usó el criterio de Perkins (S_{score}), obteniéndose la Tabla 4 y la Tabla 5.

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	mean
CCLM4	78	79	86	79	71	43	77	91	89	77
IPSL	84	78	79	80	80	79	93	79	88	84
HIRHAM5	88	84	93	83	78	76	83	90	90	81
RACMO22E	82	83	85	75	66	54	73	85	87	79
RCA4	84	83	90	84	78	71	90	80	89	80
mean	83	81	87	80	75	65	83	85	89	80

Tabla 4: Criterio de Perkins (%) de las funciones de densidad de probabilidad de la velocidad del viento para los RCMs forzados por ERA-Interim del proyecto EUROCORDEX para el periodo (1989-2008).

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	mean
REMO	92	89	87	91	87	67	88	88	90	87
PROMES	87	71	75	81	72	86	87	80	81	80
MM5	83	75	75	78	66	91	74	63	70	75
WRFB	79	68	62	63	57	88	74	66	70	70
mean	85	76	75	78	71	83	81	74	78	78

Tabla 5: Criterio de Perkins (%) de las funciones de densidad de probabilidad de la velocidad del viento para los RCMs forzados por ERA-Interim del proyecto ESCENA para el periodo (1989-2008).

La precisión con la que los RCMs son capaces de reproducir la PDF de la velocidad del viento de una zona es una buena forma de evaluar la capacidad que tienen los modelos para simular los vientos de esa área, y por lo tanto de predecir las posibles variaciones en el módulo de la velocidad del viento, que es la magnitud más determinante del potencial eólico de una zona, siempre que se considere válida la hipótesis de que la capacidad de simulación de los RCMs no varía significativamente por el hecho de simular tiempos futuros, sobretodo futuros cercanos.

Luego si se analiza la Tabla 4 y la Tabla 5, se puede apreciar que de media la capacidad de los RCMs de EUROCORDEX y de ESCENA para reproducir las PDFs de los datos medidos por las estaciones meteorológicas de ECA&D es en un 80% los primeros y en un 78% los segundos, estando comprendida de media la habilidad de los modelos en reproducir las PDFs de ECA&D entre el

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

70% y el 87%. También es interesante observar que el clúster para el que los RCMs tienen más dificultad en reproducir la PDF de ECA&D es el 5, que es el que presenta también un peor coeficiente de correlación, por lo que se puede decir que la zona del levante español e Islas Baleares es la que presenta una mayor dificultad tanto a los modelos de EUROCORDEX como a los de ESCENA a la hora de reproducir los vientos, esto puede ser debido a que es la zona con la mayor longitud de costa incluidas las islas Baleares, a su vez viene afectada a lo largo de su extensión por dos sistemas montañosos el Bético y el Ibérico y es una zona en la que confluyen la masa de aire Continental Tropical y la Mediterránea.

Por lo que se puede concluir que los RCMs parecen ser una herramienta útil para reproducir los vientos de una zona y estudiar su potencial eólico, ya que sus series temporales presentan una correlación media con las observaciones superior al 55% con un nivel de significancia superior al 95% y las PDFs de la velocidad del viento a 10m de la superficie tienen un nivel de coincidencia de media con las observaciones superior 75%.

Por otro lado, también del análisis de la Tabla 2, la Tabla 3, la Tabla 4 y la Tabla 5, se puede tratar de deducir como el incremento en la resolución de los RCMs puede afectar a los resultados. Así si se comparan los resultados de la Tabla 2 y la Tabla 3 se puede apreciar que el coeficiente de correlación medio para todos los RCMs y clústeres del proyecto ESCENA, es solamente 1% peor que el del proyecto EUROCORDEX, siendo el coeficiente de correlación del 56% el del proyecto ESCENA y del 57% el del proyecto EUROCORDEX. Con el objeto de poder apreciar si el incremento de la resolución mejora la correlación entre los resultados de los RCMs y las observaciones, se representa la correlación media de todos los modelos por clúster obteniendo la Ilustración 13.

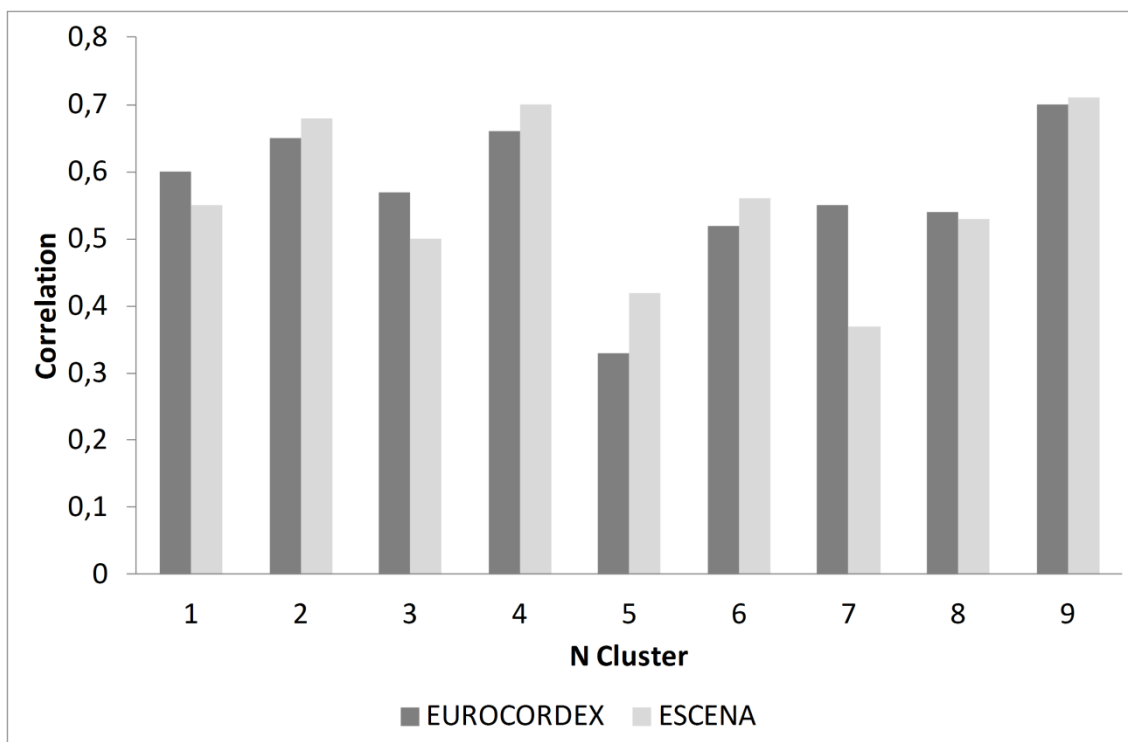


Ilustración 13: Correlación media para cada clúster de la Ilustración 10 de las series temporales mensuales de la velocidad del viento a 10m de altitud de los RCMs forzados por ERA-Interim de EUROCORDEX y ESCENA con las series temporales de los datos medidos de ECA&D, para el periodo 1989-2008.

A la vista de los resultados de la Ilustración 13, se puede apreciar que solamente para los clústeres 1, 3, 7 y 8 el coeficiente de correlación medio de los proyectos los RCMs de EUROCORDEX es más alto que el de ESCENA. Por lo que no es claro que un incremento en la resolución de los modelos se traduzca en una mejora en el coeficiente de correlación, es más según la Ilustración 13 se puede apreciar que para los clústeres 2, 5 y 6, que corresponden a zonas de costa, representando prácticamente toda la costa cantábrica y mediterránea, tienen un mejor coeficiente de correlación medio los RCMs del proyecto ESCENA que de los del proyecto EUROCORDEX, por lo que a la vista de esto se podría deducir que el incremento de la resolución puede tener el efecto contrario y en lugar de mejorar la correlación entre los resultados de los modelos y los datos medidos la empeore. Por otro lado, si parece que el incremento de la resolución puede mejorar la correlación entre los modelos y los datos experimentales en zonas dominadas por el valle de algún gran río, como puede ser en el Península Ibérica el valle del Ebro (Cluster 3) y el valle del Guadalquivir (Cluster 7). Para las zonas interiores,

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

cluster 8 y cluster 9, el incremento de la resolución de 25km² a 12,5 km² aparentemente no producen ningún efecto destacable.

Si se realiza el mismo análisis para el criterio de Perkins, se puede ver que de media para todos los clústeres, los RCMs del proyecto EUROCORDEX tiene un S_{score} un 2% que los de ESCENA. Si al igual que para el coeficiente de correlación se calcula el valor medio del S_{score} para cada clúster de la Ilustración 10 de las PDFs de la velocidad del viento a 10m de altitud de los RCMs forzados por ERA-Interim de EUROCORDEX y ESCENA con respecto a las PDFs de ECA&D, para el periodo 1989-2008, se obtiene la Ilustración 14.

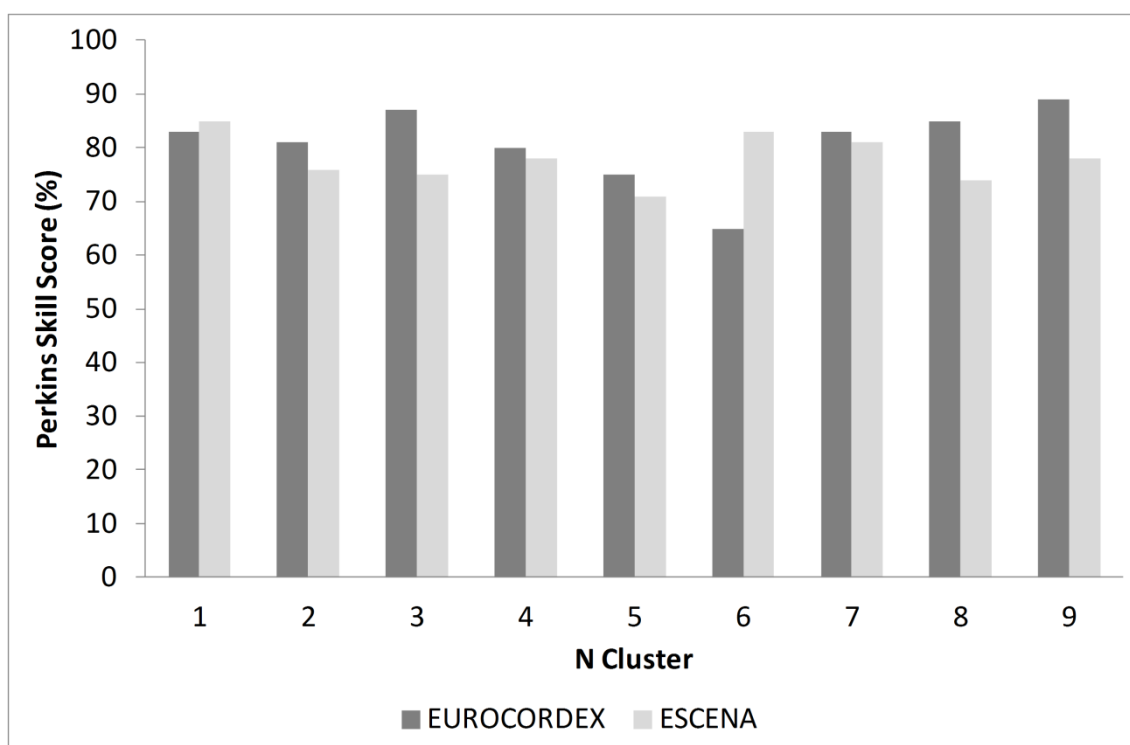


Ilustración 14: S_{score} medio para cada clúster de la Ilustración 10 de las PDFs de la velocidad del viento a 10m de altitud de los RCMs forzados por ERA-Interim de EUROCORDEX y ESCENA con respecto las PDFs de los datos medidos de ECA&D, para el periodo 1989-2008.

En este caso se obtiene que prácticamente, excepto para el clúster 6, los modelos de EUROCORDEX siempre tienen un S_{score} más alto que los del proyecto ESCENA, solamente para el clúster 1 es ligeramente superior (2%) el S_{score} de los modelos de ESCENA respecto al de los de EUROCORDEX. Si se analiza el clúster 6, se ve que es un clúster especial, ya que está formado por sólo cuatro estaciones meteorológicas y que corresponde a zonas con altas

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

velocidades de viento dando la PDF con la distribución de vientos más desplazada a la derecha de todos los clústeres. Entonces, si se elimina el resultado del clúster 6 se obtiene que de media los RCMs de EUROCORDEX tienen un $S_{score}=83\%$, mientras que los del proyecto ESCENA tienen un $S_{score}=77\%$, es decir doblando la resolución se obtiene una mejora absoluta de un 6% de media en la capacidad de los RCMs para reproducir las PDFs de la velocidad del viento a 10 metros de altitud en la Península Ibérica e Islas Baleares.

A la vista de estos resultados no se puede asegurar que exista una clara relación entre incrementar la resolución de 25km^2 a $12,5\text{ km}^2$ y la mejora de la capacidad de los RCMs para simular los vientos a 10 metros de altitud de la Península Ibérica y de las Islas Baleares, más teniendo en cuenta que el modelo que presenta el S_{score} mas alto es el modelo REMO perteneciente al proyecto ESCENA. Aunque para ser precisos, para poder analizar el efecto de la resolución en los resultados de los RCMs, se debería haber usado el mismo modelo con la misma parametrización, solamente cambiando la resolución, cosa que no se hizo. Por lo que a la luz de estos resultados, parece ser que lo único que se podría afirmar es que los modelos con una resolución de 25Km^2 generan resultados no mucho peores que los RCMs con una resolución de $12,5\text{Km}^2$

3.4 Regionalización de la Península Ibérica e Islas Baleares desde el Punto de Vista Eólico.

Una vez analizada la capacidad de los RCMs de los proyectos EUROCORDEX y ESCENA para reproducir la velocidad del viento observada a 10 metros de altura en la Península Ibérica e islas Baleares. Se estuvo en disposición de poder dividir la Península Ibérica y las Islas Baleares en regiones que tuvieran un comportamiento similar desde el punto de vista eólico. La razón de dividir la zona de estudio en regiones se debe a que estudiar cada uno de los puntos del grid de los modelos de forma individual implicaría tal cantidad de información que no sería abordable, por lo que se decidió agruparlos en el menor número

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

de regiones posible que presentaran un comportamiento lo más parecido desde el punto de vista eólico.

Para realizar esta regionalización se probaron distintas técnicas de agrupamiento con el objeto de determinar cuál es la que presenta los mejores resultados. Se probaron K-means, agrupamiento jerárquico (varianza mínima de Ward), agrupamiento espectral, y métodos de agrupamiento basados en densidad (Dbscan). Obteniéndose que la técnica que dio mejores resultados fue K-means, esto aparece explicado en el ANEXO I.

Aunque previamente a utilizar K-means, sobre los resultados de los modelos se le aplicó la técnica de análisis de componentes principales (PCA), por las mismas razones que se utilizó sobre los datos de las estaciones meteorológicas de ECA&D. Se utilizaron las 15 primeras componentes principales con lo que se conseguía también conservar una varianza superior al 90%, siendo a este nuevo conjunto formado por los puntos de grid de los modelos y las 15 primeras PC sobre el que se aplicó K-means.

Así para obtener una regionalización desde el punto de vista eólico de la Península Ibérica e Islas Baleares, se utilizaron los resultados de los RCMs de ESCENA forzados por ERA-Interim y los forzados por 20C3M ECHAM-MPIOM y los resultados de los RCMs del Conjunto 1, Conjunto 2 y del Conjunto 3 de EUROCORDEX. Obteniendo realmente cinco particiones de la Península Ibérica, una por cada Conjunto de RCMs.

Pero el hecho de usar K-means, tal y como se ha comentado anteriormente, implica tener que resolver el problema de tener que proporcionarle por anticipado el número de clústeres óptimo. Pero teniendo en cuenta que para cada Conjunto de RCMs sería deseable que las particiones obtenidas para cada modelo fueran lo más parecidas posibles, ya que esto implicaría que los modelos capturarían la misma variabilidad espacio temporal del viento y que la regionalización obtenida sería robusta, entonces se supuso que el número óptimo de clúster, debería de maximizar la similitud entre las particiones de los modelos. Usando esta idea se definió la siguiente estrategia para definir el número óptimo de clústeres.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

3.4.1 Criterio usado para obtener el número óptimo de clústeres para cada una de las regionalizaciones de los Conjuntos de RCMs usados para obtener la regionalización de la Península Ibérica y de Islas Baleares desde el punto de vista eólico.

Para encontrar el número óptimo de clústeres de uno de los Conjuntos de RCMs, lo primero que se hizo fue fusionar las particiones de cada uno de los RCMs perteneciente a ese Conjunto en una sola partición. Para realizar esto se estableció el siguiente algoritmo:

1. Se escoge como partición referencia la partición de uno de los RCMs perteneciente al Conjunto.
2. Se establece la correspondencia entre los clústeres de las particiones del resto de RCMs pertenecientes al Conjunto estudiado con la partición de referencia. Para ello se considera que un clúster de una partición de un RCM es equivalente a uno de los clústeres de la partición de referencia si es con el que comparte el área más grande.
3. Un punto pertenece a un clúster de la partición del Conjunto de RCMs si pertenece a ese mismo clúster en al menos tres particiones, si el Conjunto está formado por 4 RCMs, o en cuatro particiones, si el Conjunto está formado 5 RCMs. Pueden aparecer zonas en blanco en la partición del Conjunto ya que puede haber puntos que no se clasifiquen.

Este algoritmo se repite cogiendo la partición de cada modelo del Conjunto como referencia y tomando como partición final del Conjunto aquella que presenta más puntos clasificados. Con esto se obtiene una única partición por número de clúster y conjunto de RCMs.

Para encontrar el número de clúster óptimo para la partición del conjunto de RCMs, se pueden usar diversos criterios [70]. Utilizando estos se definió uno propio basado en los siguientes dos parámetros:

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

Compacidad: Se define compacidad C_K de la partición de uno de los conjunto de RCMs para un número K de clústeres como la compacidad media de las particiones de los RCMs perteneciente a ese conjunto. Donde la compacidad c_K de la partición para K clústeres de un modelo viene definida como la inversa de los promedios en el espacio y en el tiempo de la varianza espacial de los K clústeres:

$$c_K^{-1} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left(\frac{1}{n(k)} \sum_{j=1}^{n(k)} (x_{ij}(k) - \bar{x}_i(k))^2 \right) \right)$$

donde K es el número de clústeres de la partición, $n(k)$ es el número de elementos (puntos clasificados) del clúster k , T es el número total de días analizados, $\bar{x}_i(k)$ es la velocidad media del viento para el clúster k y el día i y $x_{ij}(k)$ es la velocidad del viento en el día i y el punto j del clúster k .

Similitud: Para definir la similitud entre las particiones de los distintos RCMs pertenecientes al mismo Conjunto, se utilizará el número de puntos clasificados como una medida de la similitud. A mayor puntos clasificados mayor similitud entre particiones.

Definiéndose el número óptimo de clústeres como el número que minimiza la inversa del producto de la compacidad con la similitud, dando la desviación estándar por punto clasificado.

Así aplicando este criterio a los conjuntos de RCMs se obtuvieron las siguientes soluciones para los RCMs de ESCENA y para los RCMs de EUROCORDEX.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

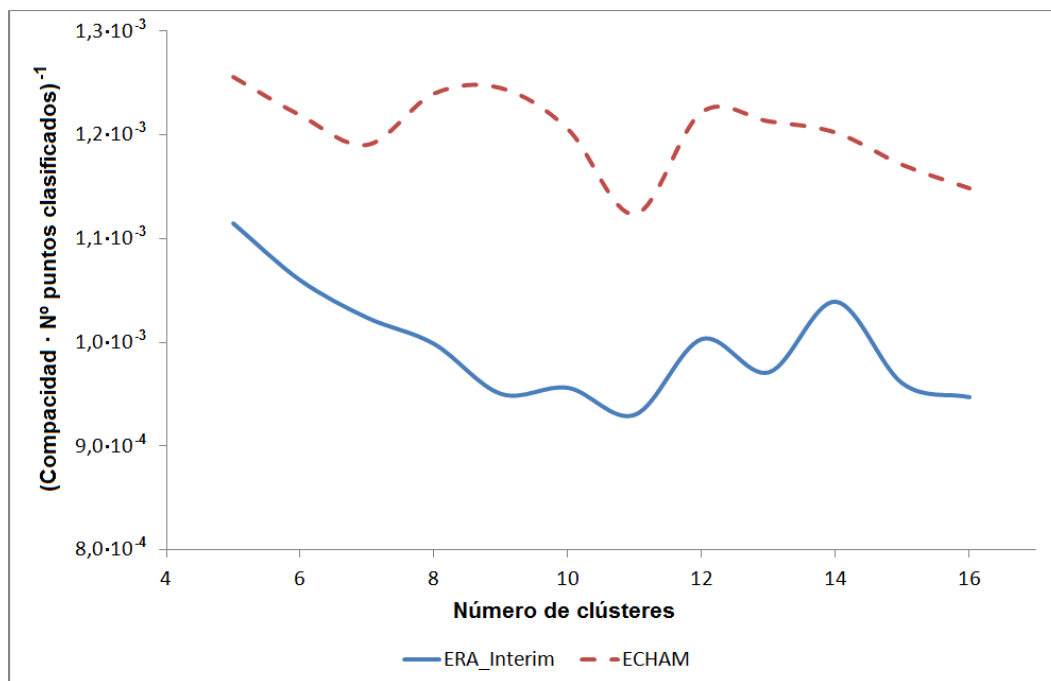


Ilustración 15: Criterio para la obtención del número óptimo de clústeres para los RCMs del proyecto ESCENA. Tanto para los RCMs forzados por ERA-Interim como los forzados por ECHAM5-MPIOM el número óptimo es 11 clústeres.

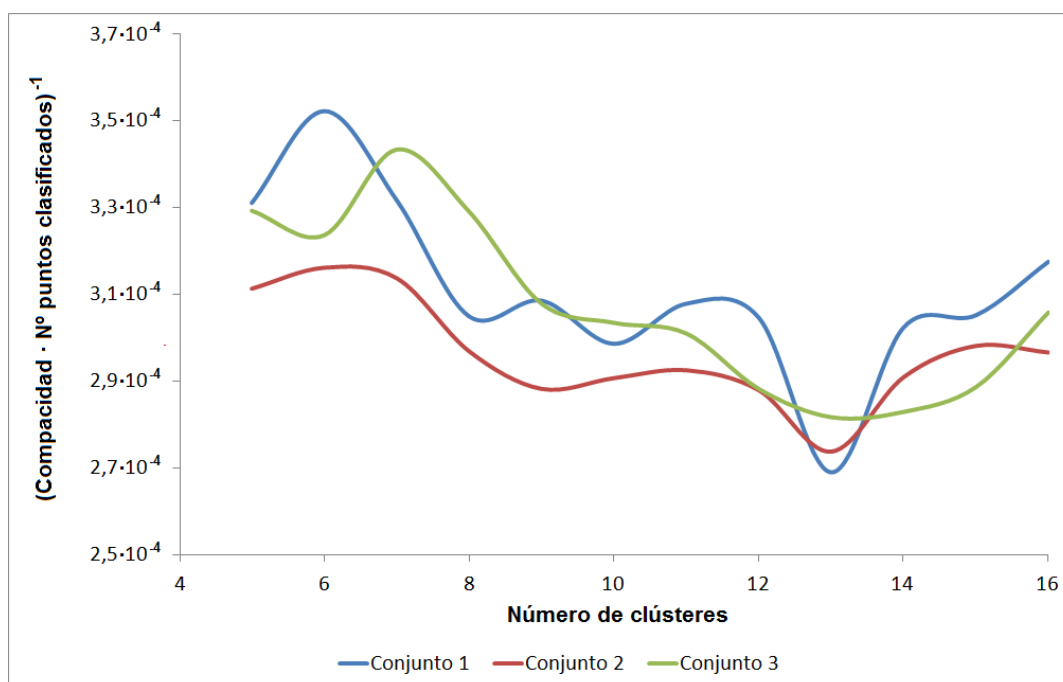


Ilustración 16: Criterio para la obtención del número óptimo de clústeres para los RCMs del proyecto EUROCORDEX. Tanto para los RCMs del Conjunto 1, como para los del Conjunto 2, como para los del Conjunto 3 el número óptimo es 13 clústeres.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

Si se estudia la Ilustración 15 y la Ilustración 16 se puede ver que el número óptimo de clústeres no es el mismo para ambas ilustraciones, aunque sí coincide por proyecto. Es decir, los RCMs del proyecto ESCENA tanto los forzados por ERA-Interim como los forzados por ECHAM5-MPIOM dan el mismo número óptimo de clústeres, 11. Lo mismo ocurre para los RCMs del proyecto EUROCORDER, en este caso el número óptimo de clústeres es 13 para todos los Conjuntos de modelos.

Una posible explicación a esta diferencia en el número óptimo de clústeres podría estar en la resolución del grid de los modelos, ya que el hecho de incrementar la resolución puede hacer que aparezcan nuevos clústeres.

También es interesante observar que la desviación estándar por punto clasificado es unas cuatro veces inferior para los RCMs del proyecto EUROCORDER que para los del proyecto ESCENA, de forma que los puntos de los clústeres del proyecto EUROCORDER son más parecidos entre sí que los del proyecto ESCENA, lo que coincide con el hecho de que el número óptimo de clústeres sea mayor para los RCMs del proyecto EUROCORDER, ya que cuanto más clústeres menor es la desviación estándar intra-clúster.

Por lo que a la vista de estos hechos, parece ser que el incremento de la resolución de los modelos hace que la clasificación sea más robusta.

3.4.2 Regionalización desde el punto de vista eólico de la Península Ibérica y de las Islas Baleares para los RCMs del proyecto ESCENA y EUROCORDER usados en esta tesis.

Una vez calculado el número de clústeres óptimo para cada uno de los Conjuntos de RCMs usados en la tesis, se obtuvo la regionalización desde el punto de vista eólico de la Península Ibérica y de las Islas Baleares para cada uno ellos, Ilustración 17 e Ilustración 18.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

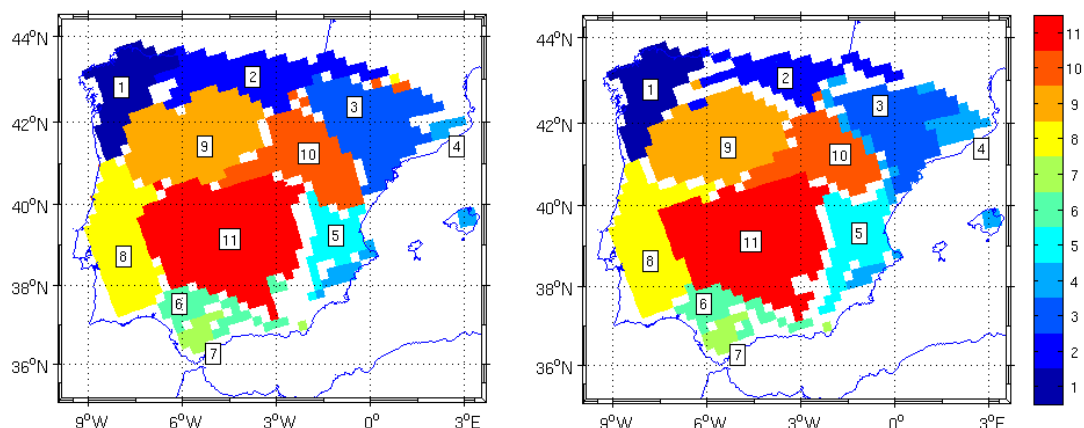


Ilustración 17: Regionalización de la Península Ibérica desde el punto de vista eólico para los modelos del proyecto ESCENA. Figura de la izquierda: RCMs forzados por ERA-Interim. Figura de la derecha: RCMs forzados por ECHAM5-MPIOM.

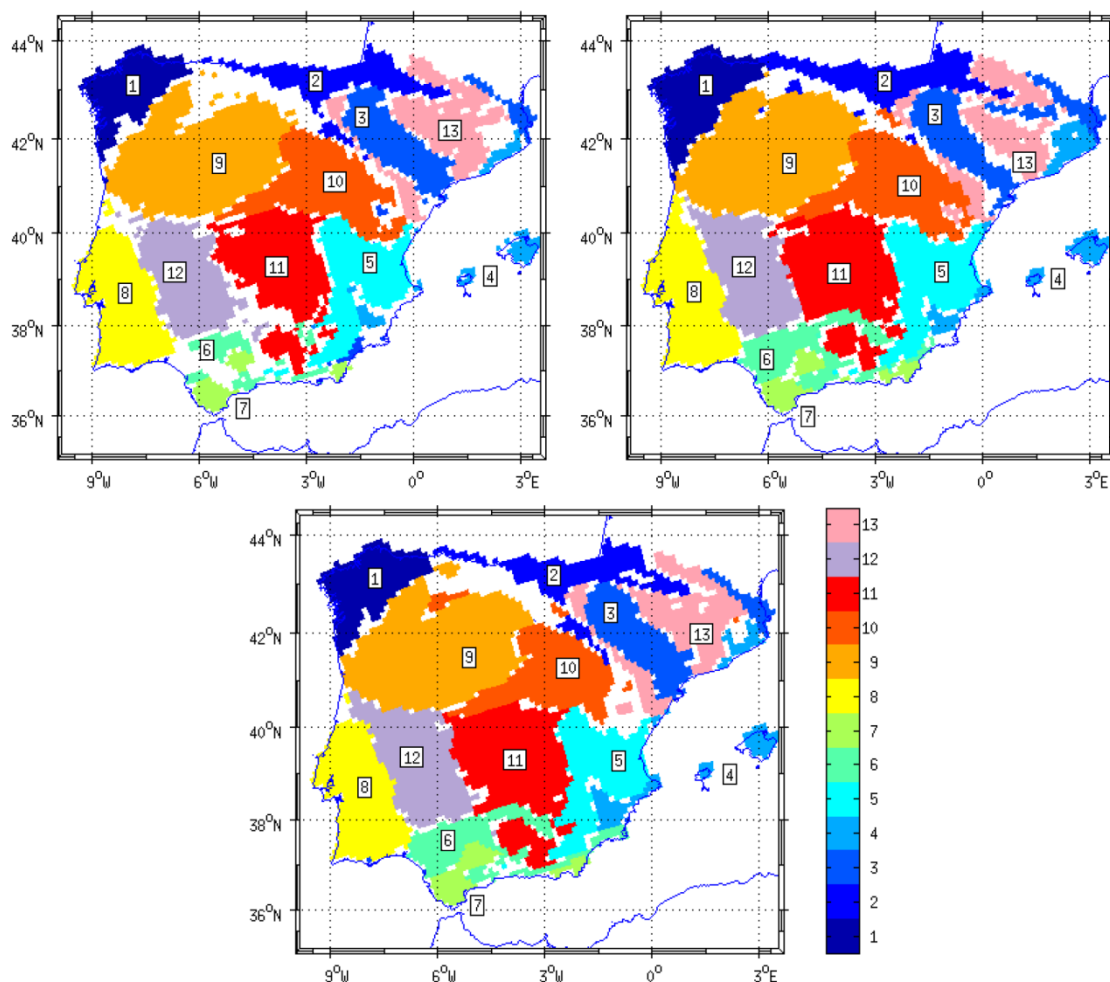


Ilustración 18: Regionalización de la Península Ibérica desde el punto de vista eólico para los modelos del proyecto EUROCORDEX. Figura de la izquierda superior Conjunto 1 de RCMs. Figura de la derecha superior Conjunto 2 de RCMs. Figura inferior Conjunto 3 de RCMs.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

Estudiando la Ilustración 17 y la Ilustración 18, se puede observar que las regionalizaciones obtenidas para un mismo proyecto tienen un gran parecido entre sí. Para cuantificar este parecido se utilizó el coeficiente (RC):

$$RC = \frac{\text{Área_Común}}{\text{Área_Total}}$$

Donde el Área_Común es el área de intersección de los clústeres equivalentes de las dos regionalizaciones que se están comparando. Área_Total es el área total de cada uno de los clústeres equivalentes, por lo que el coeficiente RC puede ser distinto para cada clúster. Dando el coeficiente RC la fracción del área de un clúster que está incluida en el clúster equivalente con respecto al área total del clúster.

Luego aplicando este criterio se obtuvieron los resultados que vienen recogidos en la Tabla 6, la Tabla 7 y la Tabla 8.

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	media
ECHAM5	0,97	1,00	1,00	0,40	0,65	0,92	1,00	0,92	0,97	0,97	0,97	0,89
ERA_Int	1,00	0,70	0,82	0,82	1,00	0,89	1,00	0,96	0,93	0,81	0,97	0,90

Tabla 6: Coeficiente RC para el Conjunto de RCMs forzados por ECHAM5_MPIOM y el Conjunto de RCMs forzados por ERA-Interim del proyecto ESCENA.

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	media
Conj. 1	0,99	0,91	0,94	0,95	0,95	0,91	0,97	0,96	0,71	0,83	0,95	0,88	1,00	0,92
Conj. 2	0,76	0,42	0,92	0,83	0,57	0,87	0,95	0,89	0,79	0,80	0,93	0,76	0,82	0,79

Tabla 7: Coeficiente RC para el Conjunto 1 de RCMs y el Conjunto 2 de RCMs del proyecto EUROCORDEX

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	media
Conj. 1	1,00	0,93	0,93	0,99	0,93	0,92	0,98	0,84	0,84	0,94	0,97	0,90	0,98	0,93
Conj. 3	0,73	0,40	0,94	0,82	0,60	0,84	0,98	0,91	0,82	0,88	0,95	0,82	0,91	0,82

Tabla 8: Coeficiente RC para el Conjunto 1 de RCMs y el Conjunto 3 de RCMs del proyecto EUROCORDEX

Si se estudia la Tabla 6, la Tabla 7 y la Tabla 8, se puede apreciar que en prácticamente todos los clústeres, el coeficiente RC toma valores superiores a 0,75, siendo el peor caso la partición del Conjunto 1 con el Conjunto 2 del proyecto EUROCORDEX que tiene un RC medio de 0,79. Lo que permite afirmar que las particiones encontradas para los conjuntos de RCMs de los distintos proyectos son soluciones robustas, ya que no presentan una dependencia fuerte con los RCMs y/o con los forzamientos usados.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

Por otro lado, si se comparan las regionalizaciones del proyecto ESCENA con las del proyecto EUROCORDEX se ve que la mayor diferencia se encuentra en que los clústeres 3 y 11 del proyecto ESCENA se dividen en dos. Así el clúster 3 de ESCENA pasa a estar formado por el clúster 3 y 13 en las regionalizaciones de EUROCORDEX, y el clúster 11 por los clústeres 11 y 12. Si además, se compara la regionalización obtenida a partir de los datos de ECA&D, Ilustración 10, con las regionalizaciones obtenidas de los RCMs del proyecto ESCENA, Ilustración 17, ya que son las tienen el número de clústeres más parecido a la regionalización de ECA&D. Se puede establecer cualitativamente una relación entre clústeres, tal y como se puede ver en la Ilustración 19, donde los colores de los clústeres y su numeración esta elegida de forma que coincidan con los usados en la partición de ESCENA, Ilustración 17. Lo que confirma que las regionalizaciones encontradas es un resultado estable, independiente de los datos de partida.

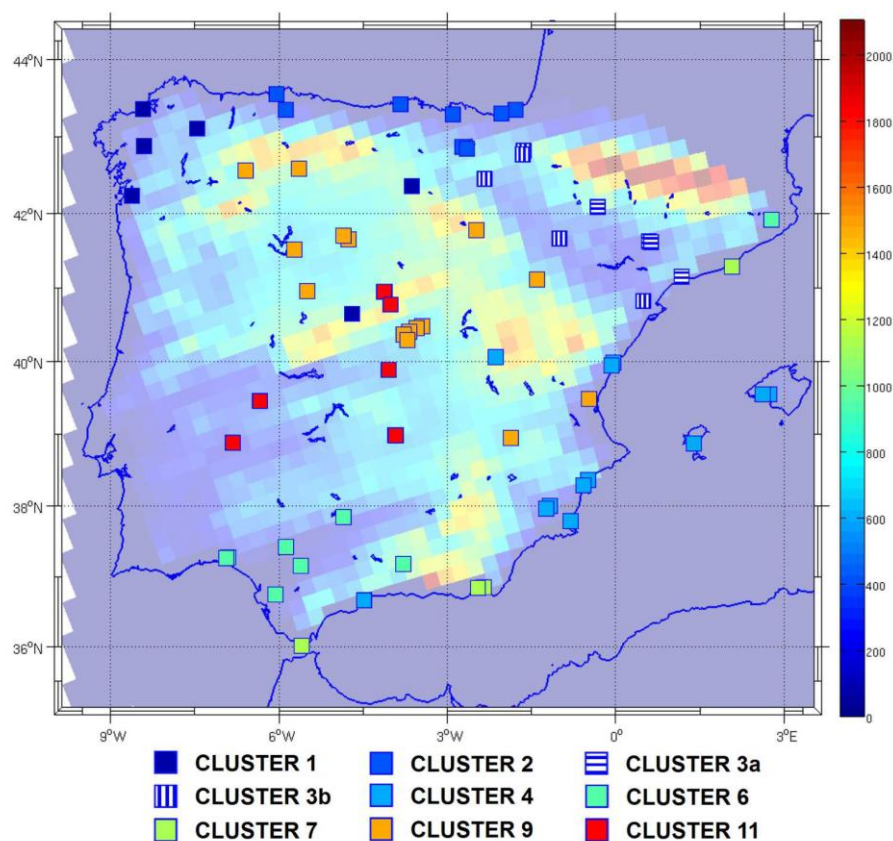


Ilustración 19: Agrupamientos de las estaciones meteorológicas de ECA&D, para nueve clústeres. Los colores y la numeración ha sido escogida para que coincida con los de la Ilustración 17.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

Por otra parte, también se puede tratar de establecer una validación subjetiva de los clústeres obtenidos para las particiones, basada en las características del viento de la Península Ibérica y de las Islas Baleares. Sabiendo que los vientos en superficie vienen muy afectados por la orografía y las diferencias del campo de presiones entre el mar y la tierra, se puede establecer de manera cualitativa e intuitiva una relación entre los clústeres obtenidos y determinadas zonas de la Península Ibérica.

Así tomando por ejemplo como referencia la regionalización de ESCENA, Ilustración 17. Se tiene que es fácil identificar determinadas regiones de la Península Ibérica con determinados clústeres, por ejemplo:

- Regiones como el valle del Ebro, la cual viene caracterizada por el viento llamado Cierzo o su opuesto, el Bochorno, los cuales son originados por el gradiente de presiones entre el mar Cantábrico y el mar Mediterráneo y canalizados por el valle del Ebro, se puede relacionar con el Clúster 3.
- El Clúster 1 se puede identificar de forma directa con Galicia, que es una zona que viene afectada por los vientos del Oeste provenientes de los sistemas de baja presión del Atlántico, siendo estos vientos bloqueados por el Macizo Galaico-Portugués y la Cordillera Cantábrica lo que permite distinguir los regímenes de vientos de la zona de Galicia (Clúster 1) de la zona de la Submeseta Norte (Clúster 9).
- El Clúster 2 se puede identificar con la zona de la costa Norte de la Península Ibérica, la cual está separada de la Submeseta Norte castellana (Clúster 9) por la Cordillera Cantábrica, la cual viene afectada por vientos de componente Norte o Sur lo que produce los efectos Foehn característicos de esta zona, al atravesar el aire la Cordillera Cantábrica.
- Por otro lado los vientos del Levante originados en la zona central del Mediterráneo y que afectan a la costa Este de la Península Ibérica y de las Islas Baleares provocando fenómenos de lluvia extrema durante el Otoño, se puede relacionar con el Clúster 5.

Capítulo 3: Caracterización de los Vientos de Superficie

- El Clúster 7 se puede relacionar de manera sencilla, con el Estrecho de Gibraltar zona situada en la entrada Oeste del mar Mediterráneo, caracterizada por sufrir fuertes vientos.
- Por otra parte el valle del Guadalquivir, zona abierta con viento de componente Suroeste dominado por los sistemas de presión del Golfo de Cádiz se puede identificar con el Clúster 6.

Este análisis muestra que hay una fuerte correspondencia entre las zonas geográficas de la Península Ibérica que presentan características propias desde el punto de vista eólico y las regionalizaciones encontradas. Lo que permite afirmar, desde un punto de vista cualitativo, que las regionalizaciones obtenidas parece ser que tienen sentido desde un punto de vista eólico.

Capítulo 4.

Estudio de la Evolución del Viento a 10 Metros de la Superficie para la Península Ibérica y las Islas Baleares Durante la Primera Mitad del Siglo XXI.

Una vez obtenida la regionalización de la Península Ibérica y de las Islas Baleares desde un punto de vista eólico, se estuvo en disposición de analizar la evolución de los vientos en la primera mitad del Siglo XXI. Para lo cual se usaron los resultados de los siguientes Conjuntos de RCMs:

- Los resultados de los Modelos Climáticos Regionales de ESCENA forzados por 20C3m ECHAM5-MPIOM durante el periodo 1980-1999, para utilizarlos como Control.
- Los resultados de los Modelos Climáticos Regionales de ESCENA forzados por ECHAM5-MPIOM A1B escenario, para obtener el campo de velocidades de viento para la Península Ibérica y las Islas Baleares para el periodo 2031-2050 y las series anuales de la velocidad del viento de la Península Ibérica y las Islas Baleares para el periodo 2005-2050.

Para realizar estos estudios se utilizó la regionalización de la Península Ibérica obtenida a partir de los RCMs de ESCENA forzados por 20C3m ECHAM5-MPIOM, figura de la derecha de la Ilustración 17. Se eligió dicha

regionalización ya que es la obtenida a partir de los resultados que se usan como Control, y tal como se ve en el punto 3.4.2 no hay grandes diferencias entre las distintas regionalizaciones.

4.1 Estudio de la Capacidad de los RCMs del Proyecto ESCENA Forzados por 20C3m ECHAM5-MPIOM Para Simular la Velocidad del Viento a 10 Metros de la Superficie en el Periodo de Control (1980-1999).

Previamente al estudio de la evolución de los vientos en la Península Ibérica y en la Islas Baleares. Se analizó la capacidad que tenían los RCMs del proyecto ESCENA forzados por 20C3m ECHAM5-MPIOM para simular la velocidad del viento a 10 metros de la superficie para el periodo de Control (1980-1999). Para ello se compararon las PDFs de las velocidades de viento de los modelos con las de los datos de ECA&D.

Para realizar esta comparación se utilizaron las series de datos diarias de las estaciones incluidas en la Ilustración 10 para el periodo (1983-1999), este periodo es 3 años más corto que el de los RCMs, pero se consideró que esa pérdida de 3 años no debería de influir mucho en la validación y extender el periodo de tiempo implicaría haber tenido que suprimir estaciones por falta de calidad de los datos de estas estaciones. Para obtener estas distribuciones se realizaron diversas acciones previas:

- Se calculó para cada uno de los clústeres de la regionalización de la figura de la derecha de la Ilustración 17, la serie temporal diaria media de las velocidades del viento a 10 metros de la superficie de las estaciones meteorológicas de ECA&D pertenecientes a cada clúster.
- Para que los datos de ECA&D se pudieran comparar con los resultados de los RCMs, se obtuvo la serie temporal media, ponderada en función de la distancia, de los cuatro primeros vecinos del grid de los RCMs para la ubicación de cada una de las estaciones de ECA&D.

Capítulo 4: Evolución del Viento Superficial para la Primera Mitad del Siglo XXI

- Una vez obtenidas las series temporales de la velocidad del viento de los RCMs para cada una de las posiciones de las estaciones meteorológicas de ECA&D, se estuvo en disposición de calcular la serie temporal media de los RCMs para cada uno de los clústeres de la regionalización escogida, figura de la derecha de la Ilustración 17.

Después de haber obtenido las series temporales diarias medias de la velocidad del viento a 10 metros de la superficie de los clústeres de la regionalización dada por la figura de la derecha de la Ilustración 17, se obtuvieron las funciones de distribución de probabilidad de estos clústeres.

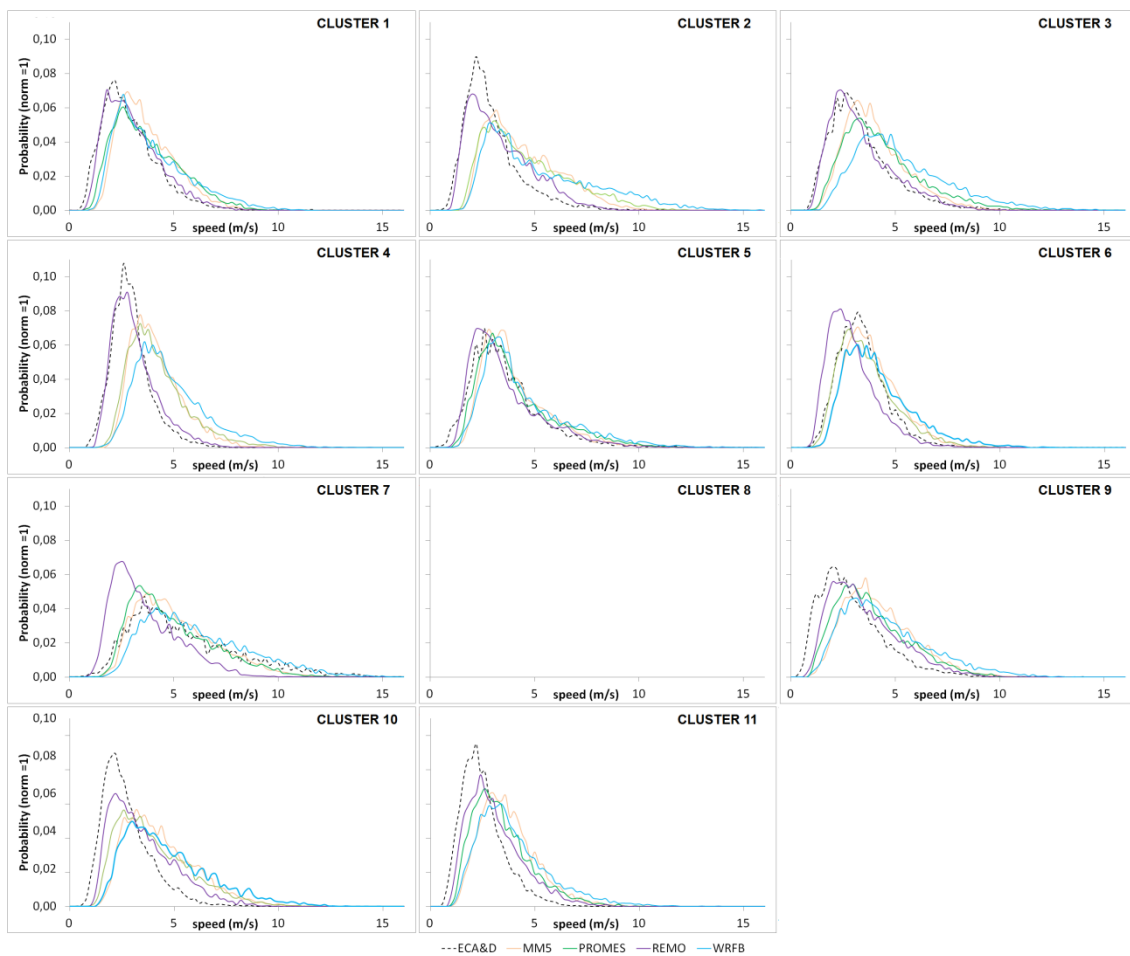


Ilustración 20: Funciones de Distribución de Probabilidad de la velocidad del viento diario superficial de los clústeres de la regionalización dada por la figura de la derecha de la Ilustración 17 para ECA&D y los RCMs forzados por ECHAM5 para el periodo 1980-1999, para evaluar la capacidad de los RCMs para simular el viento en superficie. Proyecto ESCENA.

Capítulo 4: Evolución del Viento Superficial para la Primera Mitad del Siglo XXI

Una vez obtenidas las PDFs de la velocidad del viento diario a 10 metros de la superficie de los clústeres de la regionalización dada por la figura de la derecha de la Ilustración 17 para ECA&D y los RCMs del proyecto ESCENA forzados por 20C3m ECHAM5-MPIOM para el periodo 1980-1999, se utilizó el criterio de Perkins (S_{score}) para medir la similitud entre las PDFs de ECA&D y de ESCENA para cada clúster, obteniéndose la Tabla 9. El Clúster 8 no se pudo estudiar ya que no hay ninguna estación meteorológica de ECA&D con datos de viento en dicho clúster.

Clúster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Media
REMO	93	85	93	91	90	79	66	--	85	79	81	85
PROMES	78	62	75	58	88	91	87	--	76	67	71	74
MM5	73	61	77	56	84	85	87	--	66	56	59	67
WRFB	76	56	59	46	81	81	86	--	66	55	59	64
Media:	80	66	76	63	86	84	82	--	73	64	68	72

Tabla 9: Criterio de Perkins (%) de las funciones de densidad de probabilidad de la velocidad del viento para los RCMs forzados por 20C3m ECHAM5-MPIOM del proyecto ESCENA para el periodo (1980-1999).

Si se analiza la Tabla 9, se puede ver que de media, los modelos y los clústeres, tienen un S_{score} de 72%, el cual es inferior al 78% que presentan de media los clústeres de los RCMs de ESCENA cuando son forzados por ERA-Interim Tabla 5. Este peor comportamiento también se observa si se analiza por modelo, en todos los casos los modelos forzados por ERA-Interim tuvieron un S_{score} más alto. El hecho de que se obtengan PDFs más parecidas a los datos medidos por las estaciones de ECA&D cuando los modelos son forzados por ERA-Interim que por un GCM es algo esperable, ya que ERA-Interim es una base de datos de reanálisis que se forma a partir de la asimilación de gran cantidad de datos observados.

Aún así, teniendo en cuenta que los RCMs forzados por ECHAM5 para el periodo 1980-1999 tienen una capacidad para reproducir de media el 72% de las PDFs de ECA&D, y que el modelo REMO forzado por 20C3m ECHAM5-MPIOM es el RCM que presenta el segundo S_{score} más alto, Tabla 4 y Tabla 5, sólo superado por él mismo cuando es forzado por ERA-Interim, se puede considerar que los resultados proporcionados por los RCMs forzados por ECHAM5 son útiles para estudiar la evolución del viento en superficie de la Península Ibérica.

4.2 Estudio de la Evolución de la Velocidad del Viento en la Península Ibérica y la Islas Baleares Durante la Primera Mitad del Siglo XXI.

Una vez cuantificada la capacidad de los RCMs forzados por 20C3m ECHAM5-MPIOM del proyecto ESCENA para simular la velocidad del viento a 10 metros de la superficie en la Península Ibérica y las Islas Baleares, se estudió como afecta el cambio climático a los vientos en superficie. Para eso se hicieron dos análisis, uno en el que se compararon los vientos en superficie entre el periodo 1980-1999 y 2031-2050, y otro en el que se estudió la evolución de las series temporales anuales del viento para el periodo 2005-2050.

4.2.1 Variación de la velocidad del viento a 10 metros de la superficie en la Península Ibérica y en las Islas Baleares entre los periodos de 1980-1999 y 2031-2050.

Para realizar este análisis se utilizaron los resultados de los RCMs forzados por 20C3m ECHAM5-MPIOM para obtener las series temporales diarias del viento en superficie para el periodo 1980-1999 y los resultados de los RCMs forzados por ECHAM5-MPIOM A1B escenario para el periodo 2031-2050. Una vez obtenidas las series temporales para cada RCM, se calculó la serie temporal diaria media para cada uno de los clústeres de la figura de la derecha de la Ilustración 17 para cada uno de los periodos de tiempo, y a partir de estas se obtuvieron las PDFs, la Ilustración 21 y la Ilustración 22.

Para cuantificar como de parecidas son las PDFs de los distintos modelos para un clúster dado, se definió el coeficiente (Disp) que mide la desviación media de los PDFs de los modelos respecto al caso óptimo, que sería caso en el que las PDFs de los RCMs fuesen totalmente coincidentes.

$$Disp = \frac{Area_Maxima - 1}{N_m - 1}$$

Donde *Area_Maxima* es el área total debajo de la PDF resultante de la unión de las PDFs de los RCMs para un clúster dado, N_m es el número de modelos utilizados (en este caso 4). El denominador ha sido escogido de forma que el cociente Disp ese normalizado a la unidad.

Capítulo 4: Evolución del Viento Superficial para la Primera Mitad del Siglo XXI

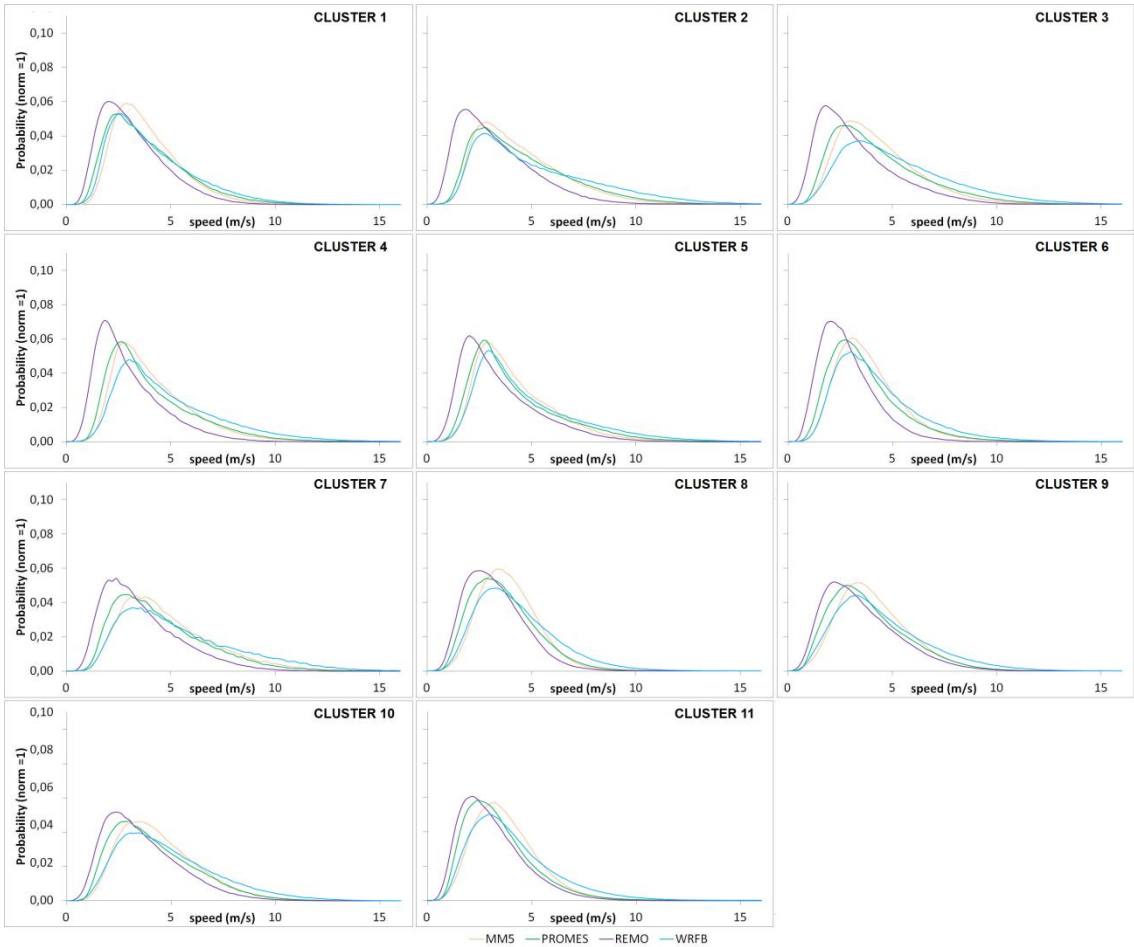


Ilustración 21: Funciones de Distribución de Probabilidad de la velocidad del viento diario superficial de los clústeres de la regionalización dada por la figura de la derecha de la Ilustración 17 para los RCMs forzados por ECHAM5 para el periodo 1980-1999. Proyecto ESCENA.

Una vez obtenidas las PDFs de los modelos para cada clúster, se calculó el área formada por la unión de las PDFs de los RCMs y el coeficiente Disp para cada clúster, obteniendo la Tabla 10:

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Media
Area Max.	1,28	1,37	1,42	1,42	1,31	1,37	1,34	1,31	1,26	1,28	1,28	1,31
Disp (%)	9	12	14	14	10	12	11	10	9	9	9	10

Tabla 10: Area_Maxima y coeficiente Disp de las PDFs de la Ilustración 21.

Tal y como se puede apreciar en la Tabla 10, el coeficiente Disp medio es del 10% y para ningún clúster se supera el 15%, lo que permite pensar que para definir la velocidad del viento para cada clúster se podría usar una única PDF resultante de normalizar la suma de las PDFs:

Capítulo 4: Evolución del Viento Superficial para la Primera Mitad del Siglo XXI

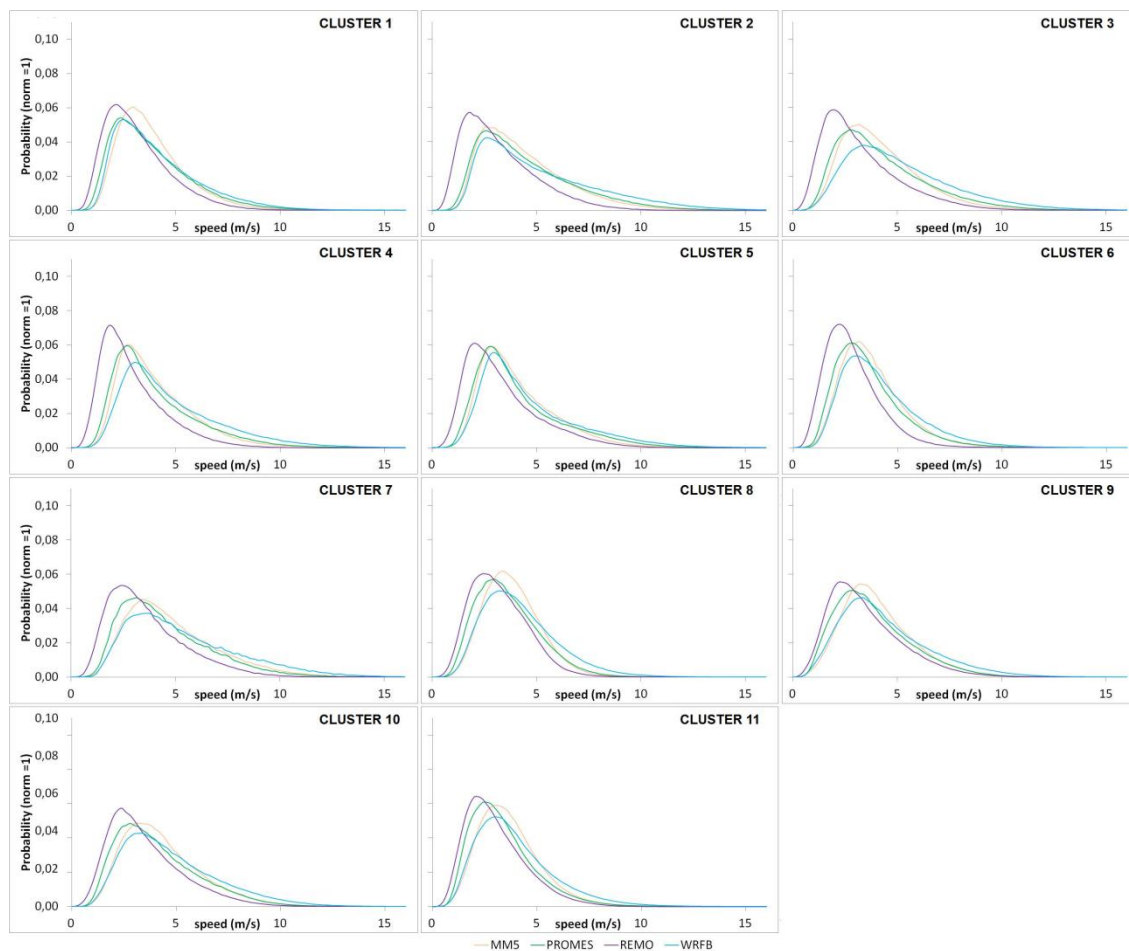


Ilustración 22: Funciones de Distribución de Probabilidad de la velocidad del viento diario superficial de los clústeres de la regionalización dada por la figura de la derecha de la Ilustración 17 para los RCMs forzados por ECHAM5 para el periodo 2031-2050. Proyecto ESCENA.

Ahora si para las PDFs de la Ilustración 22 se calcula el área encerrada debajo de la unión de las funciones de densidad de probabilidad y el cociente Disp, se obtiene la Tabla 11:

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Media
Area Max.	1,27	1,37	1,41	1,41	1,30	1,37	1,34	1,30	1,26	1,28	1,27	1,31
Disp (%)	9	12	14	14	10	12	11	10	9	9	9	10

Tabla 11: Area_Maxima y Coeficiente Disp de las PDFs de la Ilustración 22.

Al igual que para la Tabla 10, el coeficiente Disp toma un valor medio de 10% y para ningún clúster se supera el 15%, por lo que para representar los vientos de cada clúster se calculó una PDF resultante de la normalización de la suma de las PDFs de los modelos.

Capítulo 4: Evolución del Viento Superficial para la Primera Mitad del Siglo XXI

Una vez establecido para cada clúster una única PDF para cada periodo de tiempo, se compararon obteniéndose que las distribuciones de vientos para ambos periodos son muy similares tal y como se puede apreciar del análisis de la Tabla 12, en el que el coeficiente Disp medio es 0,6%, y donde el Area_Maxima media es del 1,018, es decir la PDFs de los periodos 1980-1999 y 2031-2050 son prácticamente coincidentes, por lo que para estudiar la evolución de los vientos se considero utilizar la velocidad media del viento en superficie para esos periodos.

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Media
Area Max.	1,013	1,014	1,015	1,017	1,023	1,019	1,016	1,017	1,021	1,025	1,022	1,018
Disp (%)	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0,7	0,6

Tabla 12: Area_Maxima y Coeficiente Disp de las PDFs resultantes de la normalización de la suma de las PDFs de la Ilustración 21 y de la Ilustración 22 Ilustración 21.

Luego calculando la velocidad media del viento en superficie para cada clúster de la figura de la derecha de la Ilustración 17 y para cada modelo del proyecto ESCENA, para los dos periodos de tiempo se obtiene la Tabla 13.

%	PROMES	WRF	MM5	REMO	Media
Cluster1	-1.0	-0.6	-1.2	-1.1	-1.0±0.3
Cluster2	-1.2	-1.2	-1.7	-1.4	-1.4±0.2
Cluster3	-1.3	-2.2	-2.9	-1.6	-2.0±0.7
Cluster4	-1.5	-2.0	-2.7	-2.2	-2.1±0.5
Cluster5	-2.0	-3.4	-3.1	-3.2	-2.9±0.6
Cluster6	-0.8	-1.6	-1.6	-1.0	-1.2±0.4
Cluster7	-0.0	-0.2	-0.2	-0.0	-0.1±0.1
Cluster8	-1.6	-1.6	-1.9	-1.6	-1.7±0.2
Cluster9	-1.4	-2.3	-2.5	-1.9	-2.0±0.5
Cluster10	-1.8	-2.2	-2.7	-2.6	-2.3±0.4
Cluster11	-1.5	-2.4	-2.4	-2.0	-2.1±0.4
IP+BI	-1.3	-1.8	-2.1	-1.7	-1.7±0.3

Tabla 13: Variación de la velocidad media del viento a 10 metros de la superficie para los RCMs forzados por ECHAM5-MPIOM del proyecto ESCENA. Los clústeres coloreados en gris claro presentan una variación menor que la variación media para la Península Ibérica y las Islas Baleares. Los clústeres coloreados en gris oscuro presentan una variación mayor que la variación media para la Península Ibérica y las Islas Baleares. Ilustración 21

Así según los resultados de la Tabla 13, se tiene que todos los modelos muestran una disminución de la velocidad del viento en todos los clústeres. Se

Capítulo 4: Evolución del Viento Superficial para la Primera Mitad del Siglo XXI

colorearon en gris claro, las casillas de los clústeres en los que la variación del viento es menor que la variación media para la Península Ibérica y las Islas Baleares, mientras que en gris oscuro en los que el cambio es mayor que la media para la zona estudiada. Se puede apreciar que aunque en magnitud las variaciones predichas por los modelos pueden ser distintas se tiene que excepto para los clústeres 3 y 8, los modelos coinciden en identificar las zonas que van a sufrir un cambio mayor que la media y en las que esa variación va a ser menor. Solo para los clústeres 3 y 8 hay un modelo que difiere de los demás en predecir si el cambio va a ser mayor o menor que la media.

Si se representan en un mapa de la zona estudiada los clústeres que presentan una variación menor que la media (gris claro) y una variación mayor (gris oscuro) se obtiene la Ilustración 23.

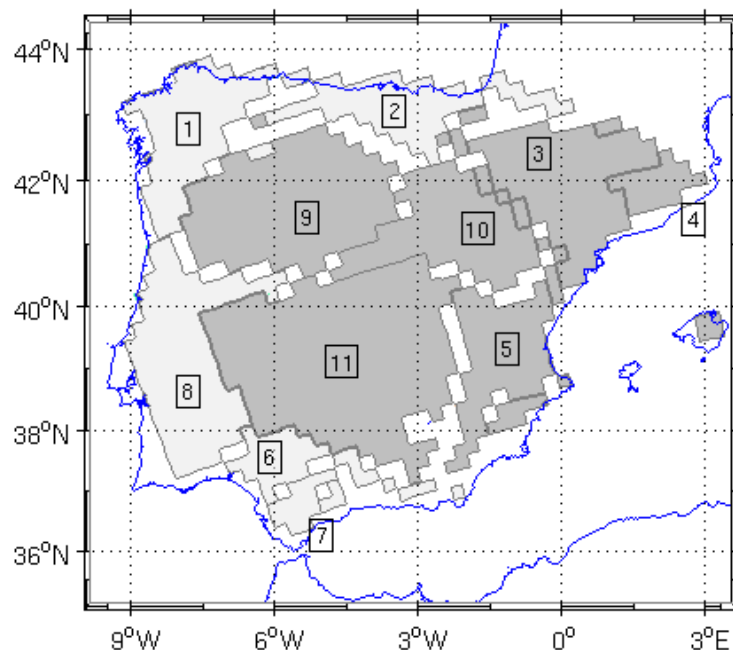


Ilustración 23: Distribución espacial de la variación de la velocidad media en superficie para el periodo 2031-2050 con respecto al periodo 1980-2000 para la Península Ibérica y las Islas Baleares. Los clústeres coloreados en gris claro presentan una variación menor que la variación media para la Península Ibérica y las Islas Baleares. Los clústeres coloreados en gris oscuro presentan un variación mayor que la variación media para la Península Ibérica y las Islas Baleares

Según la Ilustración 23 se puede ver que las regiones en las que la variación de la velocidad del viento va a ser menor que la media para el periodo 2031-2050 con respecto al periodo 1980-1999, corresponden a las zonas atlánticas y

Capítulo 4: Evolución del Viento Superficial para la Primera Mitad del Siglo XXI

cantábricas, mientras que las zonas del interior de la Península y las bañadas por el mar Mediterráneo son las que van a sufrir un mayor cambio en el módulo de la velocidad del viento.

4.2.2 Evolución interanual de la velocidad del viento en superficie en la Península Ibérica y en las Islas Baleares en el periodo 2005-2050.

Para estudiar la evolución de la velocidad del viento en superficie de la Península Ibérica y de las Islas Baleares para el periodo 2005-2050, se utilizaron las series diarias de la velocidad del viento en superficie de los RCMs forzados por ECHAM5-MPIOM A1B escenario del proyecto ESCENA para el periodo 2005-2050 y para cada clúster, a partir de estas se calculó la velocidad media por año y por estación obteniendo un nuevo conjunto de series de velocidad del viento en superficie por RCM y por clúster, son estas series las que se utilizaron para analizar la evolución del viento en superficie durante el periodo 2005-2050.

En la Ilustración 24 se representa la evolución de la velocidad del viento a 10 metros de la superficie de la Península Ibérica y de las Islas Baleares con un paso de tiempo anual por estación y por año completo para el periodo 2005-2050, para lo cual se sustrajo a las series temporales anuales de la velocidad del viento en superficie de cada clúster y cada modelo la velocidad media del viento para el periodo de estudio. Posteriormente se calculó la media ponderada entre clústeres teniendo en cuenta el tamaño del clúster para obtener una única serie para la Península Ibérica y las Islas Baleares por estación y por año completo.

Capítulo 4: Evolución del Viento Superficial para la Primera Mitad del Siglo XXI

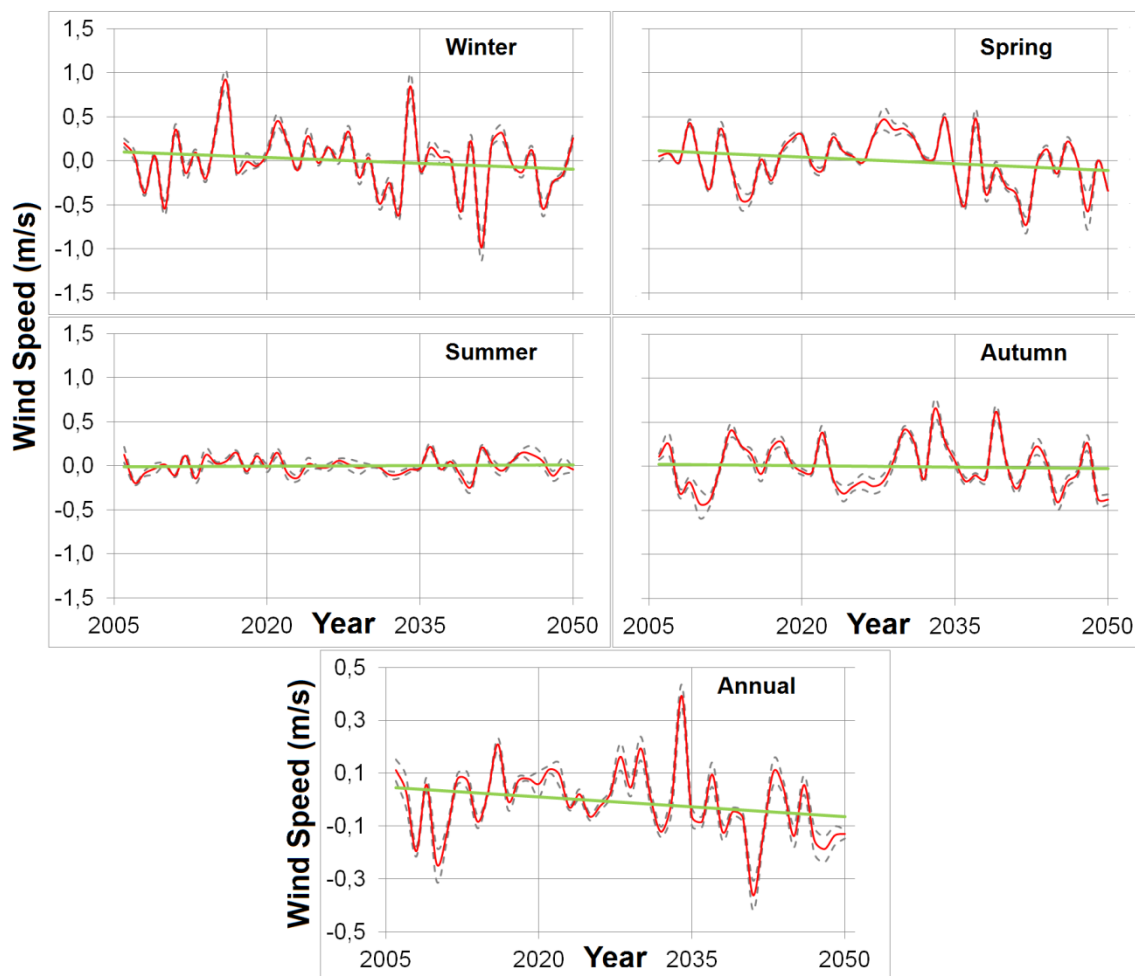


Ilustración 24: Evolución de la serie temporal anual y por estación de la velocidad media del viento en superficie en la Península Ibérica y en las Islas Baleares para el periodo de tiempo 2005-2050. La línea roja representa la media de todos los modelos. La línea gris discontinua la dispersión de los modelos. La línea verde representa la tendencia de la serie que se obtiene de ajustar por mínimos cuadrados la media de los modelos por una recta. Para obtener estas curvas se sustrajo a las series temporales el valor medio de la velocidad del viento para todo el periodo. Las tendencias marcadas con (ns) indican que no son significativas, las tendencias marcadas con (*) tiene un nivel de significancia del 10% según el test de Mann-Kendall y las marcadas con () tienen un nivel de significancia del 5% según el test de Mann-Kendall.**

Si se estudia la Ilustración 24 se puede ver que la dispersión que presentan los modelos no es muy grande para todas las series tanto las estacionales como la anual, presentando los RCMs un patrón de evolución similar. La dispersión de los modelos se calculó sumando y restando al valor medio la desviación estándar de los valores de las series de los modelos para ese año. También se puede observar que excepto para el verano, en la que la tendencia es

Capítulo 4: Evolución del Viento Superficial para la Primera Mitad del Siglo XXI

ligeramente positiva, para el resto de estaciones es negativa, siendo el invierno y la primavera las estaciones con las tendencias más negativas. Para analizar la significancia de las tendencias se usó el test de Mann kendall, obteniéndose que las series temporales para las estaciones del año presentan un nivel de significancia mayor de 10%, valor que se marcó como límite para considerar que una tendencia de una serie es significativa, de forma que si la tendencia no supera el valor marcado como límite se considera significativa. Por otro lado, la serie que presenta la evolución del viento año a año para el periodo 2005-2050 si tiene un nivel de significancia Mann-Kendall menor del 5%.

Un estudio más detallado de la evolución temporal del viento en superficie en la Península Ibérica y en las Islas Baleares aparece en los resultados recogidos en la Tabla 14, donde se analizan las tendencias que presentan las series temporales del viento en superficie no sólo considerando la Península Ibérica y las Islas Baleares como un todo, si no para cada clúster de la figura de la derecha de la Ilustración 17. En este análisis, al igual que en la Ilustración 24, se estudió la tendencia de la evolución de la velocidad del viento en superficie a lo largo de las estaciones y de los años.

	Invierno	Primavera	Verano	Otoño	Año
CLUSTER 1	-1.4	-3.3	-1.2*	-1.4	-1.8*
CLUSTER 2	-4.5	-5.1	-1.9	-2.0	-3.4**
CLUSTER 3	-8.5**	-6.5**	-0.1	-0.2	-3.8**
CLUSTER 4	-6.6	-2.8	0.6	-1.9	-2.7**
CLUSTER 5	-7.6	-5.4	2.1	-3.9	-3.7**
CLUSTER 6	-2.0	-4.2*	-2.2*	-2.0	-2.6**
CLUSTER 7	4.4	0.6	-12.9**	1.1	-1.7*
CLUSTER 8	-2.6	-6.4**	3.3*	-0.4	-1.5*
CLUSTER 9	-4.0	-3.9	0.2	-0.9	-2.4**
CLUSTER 10	-7.1*	-5.9	1.7	-1.6	-3.2**
CLUSTER 11	-1.4	-3.3	-1.2*	-1.4	-1.8*
PI+IB	-4.5	-5.1	-1.9	-2.0	-3.4**

Tabla 14: Tendencias del viento superficial en (mm/s/año) para el periodo 2005-2050. Las tendencias marcadas con (*) tiene un nivel de significancia del 10% según el test de Mann-Kendall y las marcadas con () tienen un nivel de significancia del 5% según el test de Mann-Kendall.**

Si se analiza la Tabla 14, se puede ver que excepto para el clúster 7, que corresponde al punto más meridional de la Península Ibérica, todos los demás presentan tendencias negativas a lo largo de todas las estaciones excepto para

Capítulo 4: Evolución del Viento Superficial para la Primera Mitad del Siglo XXI

el verano. Para esta estación se alternan clústeres con tendencia positiva con negativa. Aún así, lo más destacable de este análisis del signo de la tendencia de la velocidad del viento en superficie, es el comportamiento del clúster 7, ya que es opuesto al resto de clústeres, presentando tendencias positivas en todas las estaciones del año, excepto en verano en la que es fuertemente negativa.

Otro resultado interesante es, que mientras que las tendencias anuales para todos los clústeres presentan un nivel de significancia, según el test de Mann-Kendall, inferior a 0,05, si se exceptúa el clúster 1 (0,10), clúster 7 (0,09) y clúster 8 (0,06). Esto no ocurre para las series estacionales en las que el nivel de significancia es superior a 0,10, por lo que se puede deducir que las tendencias negativas de las series estacionales se refuerzan entre ellas dando lugar a una serie anual con una tendencia negativa claramente significativa.

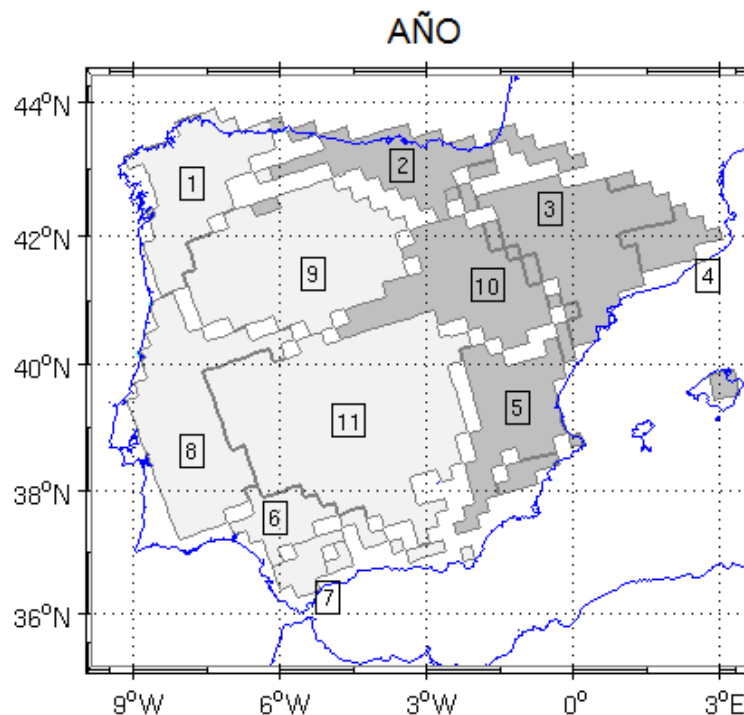


Ilustración 25: Distribución espacial de las tendencias de las series anuales de la velocidad superficial en la Península Ibérica y en las Islas Baleares para el periodo 2005-2050. Los clústeres coloreados en gris claro presentan una tendencia menos negativa que la tendencia media para la Península Ibérica y las Islas Baleares. Los clústeres coloreados en gris oscuro presentan una tendencia más negativa que la tendencia media para la Península Ibérica y las Islas Baleares.

Capítulo 4: Evolución del Viento Superficial para la Primera Mitad del Siglo XXI

En la Ilustración 25 están coloreados con gris claro, los clústeres para los que la tendencia de su serie anual del viento en superficie es menos negativa que la tendencia media para la Península Ibérica y para las Islas Baleares, mientras que los clústeres con series con tendencias más negativas que la media para la Península Ibérica y para las Islas Baleares están colorados de gris oscuro.

Entonces si se estudia la Ilustración 25, se puede apreciar que hay un claro contraste Oeste-Este, donde las regiones del Oeste más afectadas por las masas de aire proveniente del Atlántico sufren una disminución en el módulo de la velocidad del viento en superficie menor que las zonas más al Este de la Península Ibérica.

Capítulo 5.

Estudio de la Robustez de la Bajada de Escala (Downscaling) de la señal climática Velocidad del Viento en Superficie para la Península Ibérica y las Islas Baleares.

Para realizar este análisis se utilizaron los resultados de los Conjuntos de RCMs del proyecto EUROCORDEX.

El gran número de simulaciones disponibles en EUROCORDEX permitió seleccionar conjuntos en los cuales diferentes modelos climáticos regionales son forzados con el mismo modelo global y conjuntos en los que el mismo modelo regional es forzado con diferentes modelos globales. Así, analizando un conjunto de simulaciones de distintos modelos regionales que utilizan las mismas condiciones de contorno se puede cuantificar la incertidumbre de la señal climática de los vientos sobre la Península Ibérica que es debida a las diferencias en los modelos regionales. Por otra parte, con simulaciones en las que el mismo modelo regional ha sido forzado con distintos modelos globales se puede cuantificar la contribución de los modelos globales a la incertidumbre en la señal climática en los vientos simulados. Con este fin se seleccionaron los siguientes conjuntos de simulaciones:

- El Conjunto 1, compuesto por simulaciones con RACMO22E, HIRHAM5, CCLM4, RCA4 y WRF331F forzados por ERA-Interim.

Capítulo 5: Robustez de la Bajada de Escala en la señal climática.

- El Conjunto 2, compuesto por simulaciones en las que ICHEC-EC-EARTH es usado para forzar RACMO22E, HIRHAM5, CCLM4 y RCA4.
- El conjunto 3, en el que RCA4 es forzado por 5 modelos climáticos globales: CNRM-CM5, EC-EARTH, CM5A-MR, HadGEM2-ES y MPI-ESM-LR.

Los Conjuntos 1 y 2, en los que las simulaciones se llevan a cabo en el mismo dominio (EUROCORDEX) y con la misma resolución, permiten estudiar la incertidumbre que aportan las diferencias en las formulaciones físicas y numéricas de los modelos regionales al viento simulado. Este estudio es una primera aproximación, ya que sería deseable también incluir una cuantificación de la variabilidad interna inherente a cada modelo y para un estudio completo de esta incertidumbre se necesitaría que cada modelo estuviera representado por un ensamble con condiciones iniciales distintas.

De manera semejante, en el Conjunto 3 se puede estudiar la incertidumbre asociada a la elección del modelo global usado como forzamiento y utilizando la metodología desarrollada en este capítulo cuantificar dicha incertidumbre.

Para calcular la incertidumbre asociada a las simulaciones de cada Conjunto de RCMs se utilizaron las funciones de distribución de probabilidad de la velocidad del viento en superficie para cada uno de los modelos en cada uno de los clústeres de las regionalizaciones que se representan en la Ilustración 18. Para cada Conjunto de RCMs se usó su propia regionalización, se decidió realizar esto en lugar de usar una única regionalización para las simulaciones de los tres Conjuntos de RCMs, debido a que las tres regionalizaciones son muy parecidas y los clústeres entre ellas son fácilmente identificables, además no se encontró un criterio claro para elegir una única regionalización, ya que unas regionalizaciones clasifican puntos que otras no lo hacen o los clasifican dentro de distintos clústeres, luego si se usase la misma regionalización para los tres Conjuntos se estaría agrupando en algunos casos puntos en clústeres que no les corresponderían según K-means, por lo que se descartó utilizar una única regionalización para todos los Conjuntos.

Capítulo 5: Robustez de la Bajada de Escala en la señal climática.

Para calcular las PDFs de la velocidad del viento en superficie en cada clúster identificado se sumaron las PDFs de cada uno de los puntos de la malla pertenecientes a dicho clúster y se normalizó la PDF resultante. Este procedimiento se llevó a cabo para todos los clústeres de las regionalizaciones usadas. Las distribuciones de probabilidad obtenidas en cada grupo se representan en la Ilustración 26 para el Conjunto 1, en la Ilustración 27 para el Conjunto 2 y en la Ilustración 28 para el Conjunto 3.

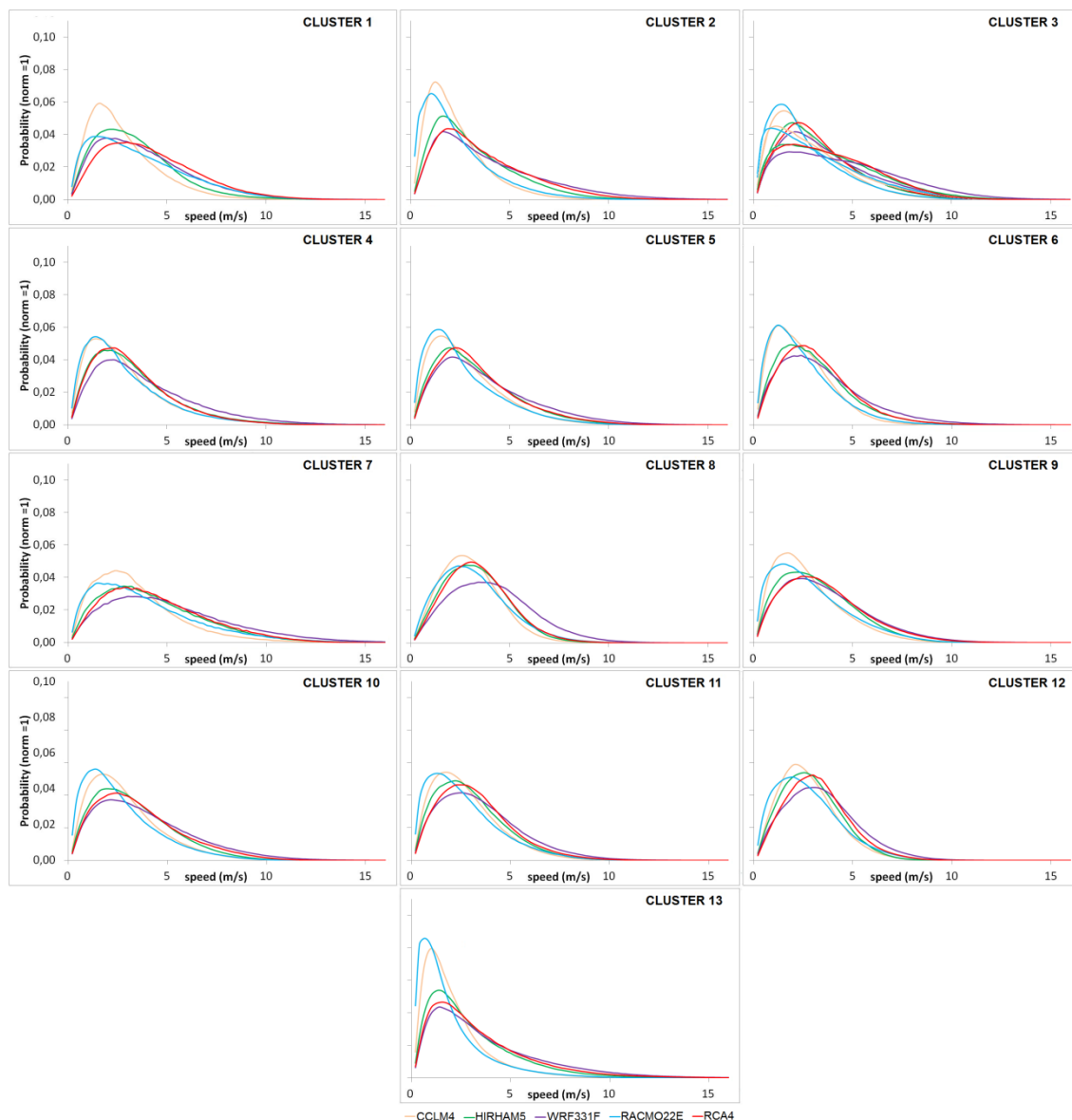


Ilustración 26: PDFs de la velocidad superficial de cada RCM del Conjunto 1 del proyecto EUROCORDEX para cada uno de los clústeres de la regionalización obtenida para el Conjunto 1 de RCMs del proyecto EUROCORDEX de la Ilustración 18. Las distintas PDFs han sido obtenidas normalizando la PDF resultante de la suma de las PDFs de los puntos pertenecientes al mismo clúster y modelo.

Capítulo 5: Robustez de la Bajada de Escala en la señal climática.

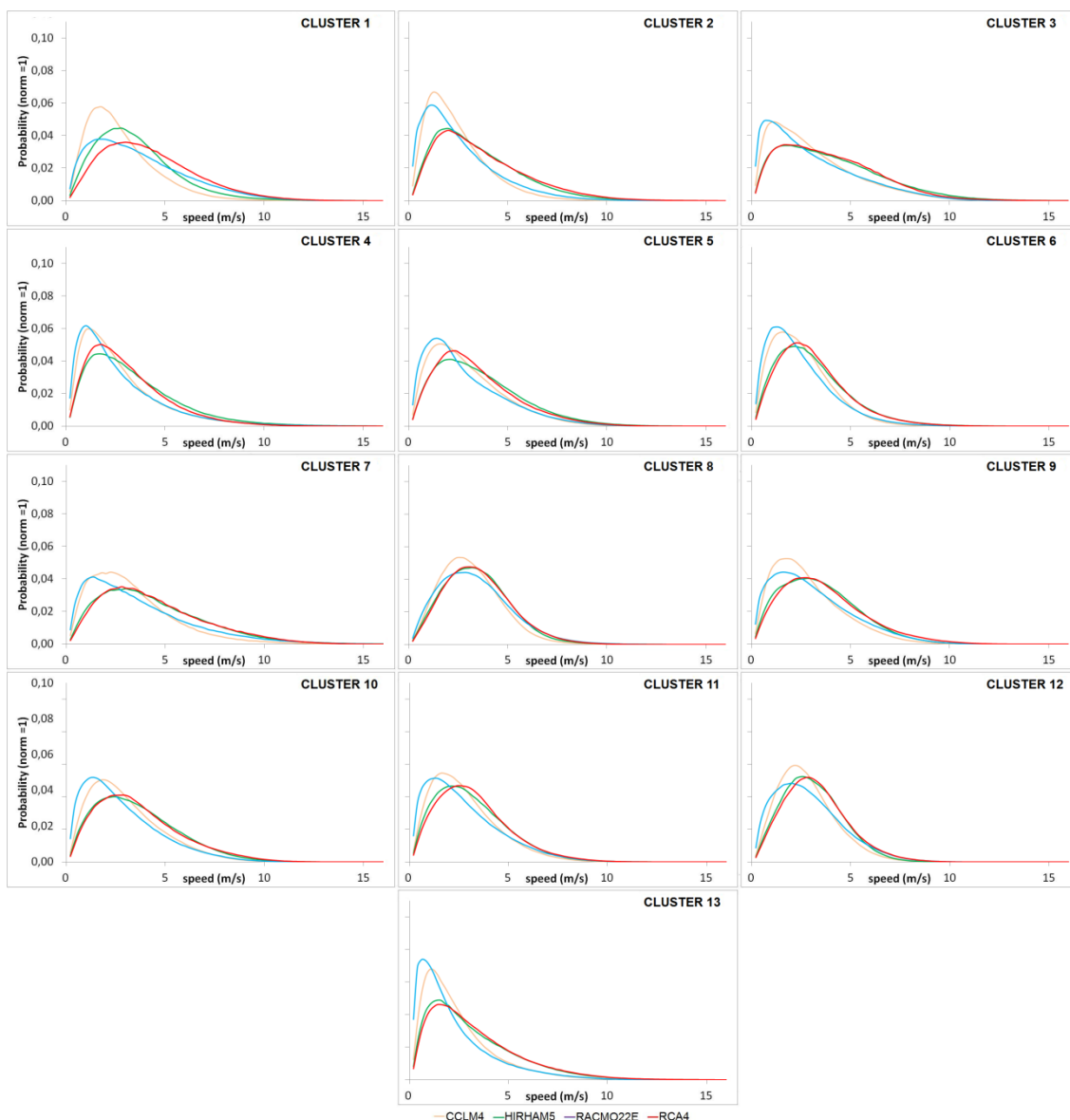


Ilustración 27: PDFs de la velocidad superficial de cada RCM del Conjunto 2 del proyecto EUROCORDEX para cada uno de los clústeres de la regionalización obtenida para el Conjunto 2 de RCMs del proyecto EUROCORDEX de la Ilustración 18. Las distintas PDFs han sido obtenidas normalizando la PDF resultante de la suma de las PDFs de los puntos pertenecientes al mismo clúster y modelo.

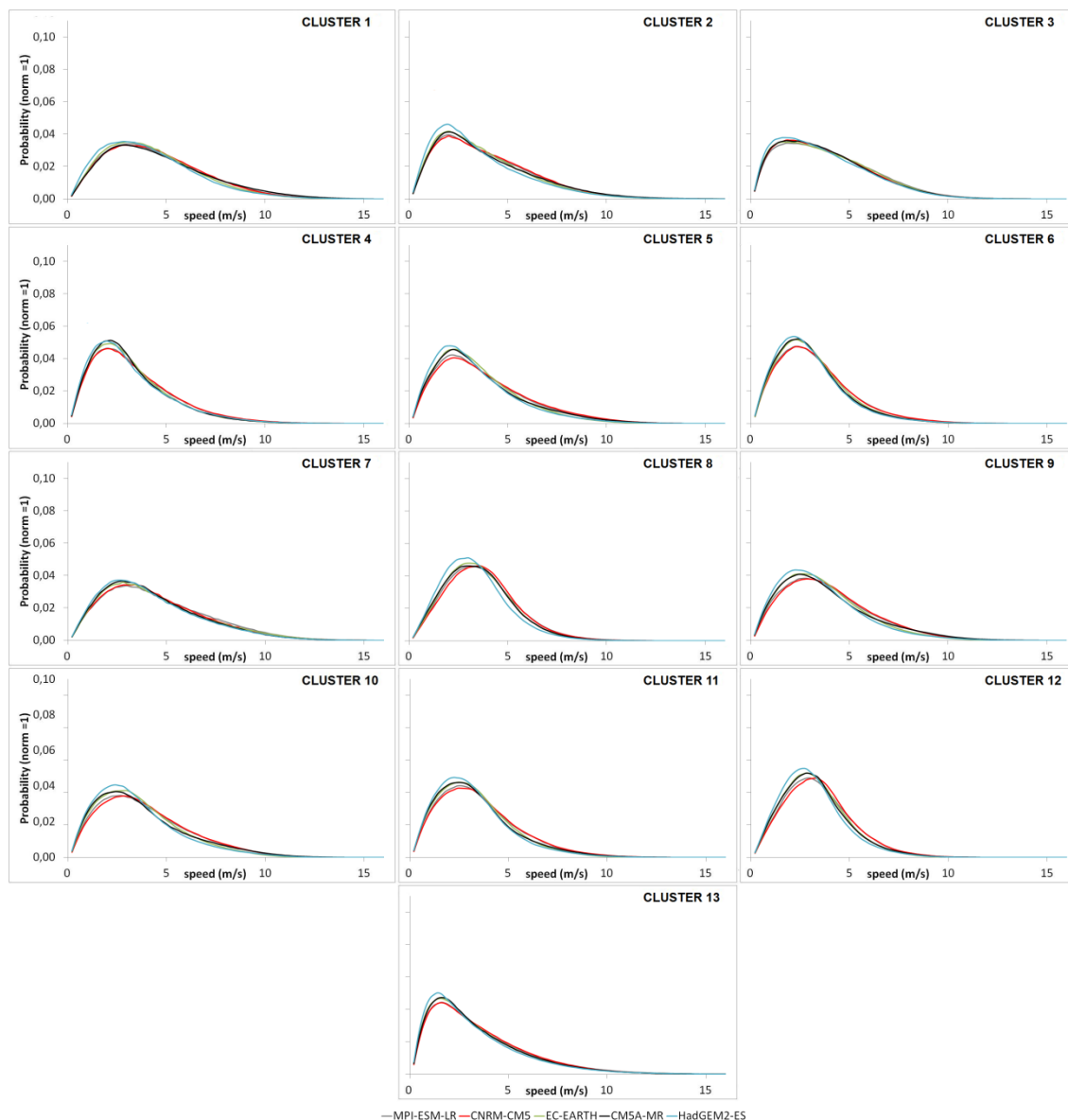


Ilustración 28: PDFs de la velocidad superficial de cada RCM del Conjunto 3 del proyecto EUROCORDEX para cada uno de los clústeres de la regionalización obtenida para el Conjunto 3 de RCMs del proyecto EUROCORDEX de la Ilustración 18. Las distintas PDFs han sido obtenidas normalizando la PDF resultante de la suma de las PDFs de los puntos pertenecientes al mismo clúster y modelo.

Si se comparan las PDFs de las simulaciones del Conjunto 1 y del Conjunto 2, se puede apreciar que las distribuciones de probabilidad para el mismo modelo son parecidas y prácticamente no dependen del forzamiento elegido. Para cuantificar el parecido entre las PDFs del mismo modelo se utilizó el coeficiente Disp, definido en el punto 4.2.1, obteniéndose la Tabla 15.

Capítulo 5: Robustez de la Bajada de Escala en la señal climática.

Disp(%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	media
CCLM4	3,1	3,4	3,8	1,0	5,6	0,8	2,0	4,0	7,8	2,6	2,2	4,0	1,3	3,2
HIRHAM5	0,9	1,4	6,1	3,2	3,0	4,7	2,9	6,0	4,5	1,5	5,6	6,7	3,2	3,8
RACMO22E	5,1	0,9	4,1	2,4	7,0	3,0	4,1	3,7	7,2	4,1	4,1	4,9	2,1	4,1
RCA4	2,0	2,6	1,6	0,6	4,5	0,9	1,9	2,4	2,3	1,0	1,1	1,6	1,6	1,9

Tabla 15: Coeficiente Disp para las PDFs de la velocidad del viento para el mismo RCM del Conjunto 1 y del Conjunto 2 del proyecto EUROCORDEX.

Se puede apreciar que la diferencia media entre las distintas distribuciones es menor del 5%. Eso indicaría que la dependencia que muestran los resultados de los RCMs con respecto al forzamiento elegido es baja.

Por otro lado, si se calcula el coeficiente Disp para las distribuciones del Conjunto 3 de RCMs del proyecto EUROCORDEX, y para el modelo RCA4 cuando es forzado por ERA-Interim, es decir del Conjunto 3 del proyecto EUROCORDEX. Se obtiene la Tabla 16.

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	media
Max. Area	1,07	1,08	1,11	1,09	1,07	1,11	1,11	1,11	1,07	1,07	1,11	1,10	1,09	1,09
Disp(%)	1,4	1,7	2,1	1,7	1,5	2,1	2,2	2,1	1,4	1,3	2,1	1,9	1,8	1,8

Tabla 16: Coeficiente Disp para las PDFs de la velocidad del viento para el Conjunto 3 de RCMs del proyecto EUROCORDEX, más las PDFs del modelo RCA4 del Conjunto 1 del project EUROCORDEX.

Como se puede apreciar, el valor medio del coeficiente Disp es 1,8%, esto refuerza la idea que la dependencia de los resultados de los RCM con el forzamiento elegido es bajo, en este caso menor del 2%.

Por otro lado, para estudiar los efectos que tiene la elección del RCM en los resultados la velocidad en superficie, se aplicó el coeficiente Disp sobre las distribuciones del Conjunto 1 y Conjunto 2 de RCMs del proyecto EUROCORDEX, es decir las PDFs de la Ilustración 26 y de la Ilustración 27, obteniéndose la Tabla 17 y la Tabla 18 respectivamente.

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	media
Max. Area	1,28	1,27	1,25	1,24	1,22	1,25	1,27	1,28	1,39	1,25	1,23	1,37	1,30	1,28
Disp(%)	7,0	6,6	6,3	6,0	5,6	6,2	5,4	7,0	9,9	6,2	5,8	9,2	7,5	6,8

Tabla 17: Coeficiente Disp para las PDFs de la velocidad del viento para el Conjunto 1 de RCMs del proyecto EUROCORDEX.

Capítulo 5: Robustez de la Bajada de Escala en la señal climática.

Cluster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	media
Max. Area	1,22	1,20	1,20	1,18	1,20	1,18	1,12	1,22	1,27	1,22	1,21	1,29	1,32	1,22
Disp(%)	7,3	6,6	6,6	6,0	6,8	5,9	4,1	7,4	9,0	7,3	6,9	9,7	10,6	7,2

Tabla 18: Coeficiente Disp para las PDFs de la velocidad del viento para el Conjunto 2 de RCMs del proyecto EUROCORDEX.

Luego si se comparan los resultados de la Tabla 16, la Tabla 17 y la Tabla 18, se puede observar que cuando lo que se varía el forzamiento, las PDFs de los resultados del modelo RCA4 muestran un coeficiente Disp menor del 2%, mientras cuando lo que se varía es el RCM el coeficiente Disp de las PDFs crece hasta el 6,8% y el 7,2%, luego este estudio revela que los resultados de la simulación del viento en superficie de la Península Ibérica y de las Islas Baleares utilizando los RCMs del proyecto EUROCORDEX tienen una dependencia más fuerte con el RCM elegido que con el forzamiento elegido.

Luego este resultado implica que la elección del RCM a usar, o su parametrización, introduce mayor incertidumbre en los resultados, en este caso la velocidad del viento en superficie, que la elección del forzamiento. Por lo que se puede deducir a priori, que donde hay mayor margen de mejora en las simulaciones es en la elección del RCM, o en su parametrización.

Así para saber las simulaciones de que RCM, o de que parametrización de ese modelo, se aproximan más a la realidad, se pueden comparar a posteriori los resultados de las simulaciones con los datos reales de estaciones meteorológicas, tal y como se ha realizado en esta tesis en el punto 3.3 y el punto 4.1 con la velocidad del viento en superficie. Pero este análisis no está exento de dificultades, sobre todo para la variable velocidad del viento, ya que los datos de las simulaciones son las velocidades medias de zonas de decenas de kilómetros cuadrados mientras que los datos de las estaciones son valores representativos del lugar donde está la estación meteorológica, y como la magnitud velocidad del viento es muy susceptible a fenómenos locales, realmente los resultados de los RCMs y de las estaciones no son comparables directamente y hay que pretratarlos previamente tal y como se describe en el punto 3.3 y el punto 4.1. Además la validación de los modelos en lo que respecta a la velocidad del viento tiene la dificultad añadida que las bases de datos de calidad no son abundantes, así en esta tesis los campos de vientos de

Capítulo 5: Robustez de la Bajada de Escala en la señal climática.

los modelos correspondientes a Portugal no se pudieron validar por no disponer de datos.

Así con el objeto de solventar los problemas que presenta la validación de los campos de velocidades del viento dados por RCMs, pocos datos medidos disponibles, y la velocidad del viento simulada y medida no son magnitudes directamente comparables. En el Anexo II se propone una metodología, basada en la hipótesis, de que como las variables climáticas están relacionadas entre sí, se supone que el RCM que sea capaz de simular mejor el clima de una zona debería de ser el que mejor reprodujese también el campo de vientos de esa zona. Con esto se podría solventar los dos problemas antes apuntados, ya que las variables clásicas que definen el clima, la precipitación y la temperatura, son variables de las que hay muchos más datos disponibles y son mucho menos susceptibles a fenómenos locales que la velocidad del viento. Es conveniente advertir que los resultados y conclusiones recogidos en el Anexo II corresponden a una investigación abierta en la que hay muchas incógnitas aún por resolver.

.

Capítulo 6.

Conclusiones.

En esta tesis se ha caracterizado el viento simulado por diferentes modelos climáticos regionales y se ha estudiado, desde el presente hasta el año 2050, la evolución de la velocidad del viento a 10 metros de la superficie en la Península Ibérica y en las Islas Baleares. Con este fin se desarrolló una nueva metodología basada en la técnica de agrupamiento K-means, que permite obtener una regionalización de la Península Ibérica y de las Islas Baleares desde el punto de vista eólico, y posteriormente analizar las características que presenta la velocidad del viento en esos clústeres obtenidos.

El análisis de diferentes conjuntos de simulaciones realizadas en los proyectos ESCENA y EUROCORDEX permitió obtener cinco regionalizaciones de la Península Ibérica y de las Islas Baleares. Las particiones encontradas para las simulaciones del proyecto ESCENA resultaron compuestas por 11 clústeres, mientras que las simulaciones del EUROCORDEX estaban compuestas por 13 clústeres.

Las regionalizaciones obtenidas, Ilustración 17 y la Ilustración 18, tienen un parecido notable, lo que indica su robustez, presentando poca dependencia con la elección de los RCMs o los forzamientos. Para cuantificar este parecido entre las particiones de un mismo proyecto se utilizó el cociente RC definido en el punto 3.4.2. Dicho coeficiente nos indica que el parecido entre las regionalizaciones del proyecto ESCENA es del orden del 90% de media

Capítulo 6: Conclusiones

mientras que el de las del proyecto EUROCORDERX es del orden del 87% de media. Por otro lado, el cálculo del RC entre particiones de los distintos proyectos, Ilustración 17 e Ilustración 18, muestra que la principal diferencia reside en que los clústeres 3 y 11 de las particiones de ESCENA se dividen en dos, pasando a ser los clústeres 3 y 13 y los clústeres 11 y 12 respectivamente en las particiones del proyecto EUROCORDERX. Se supone que la diferencia en el número óptimo de clústeres entre las particiones del proyecto ESCENA y las del proyecto EUROCORDERX, podría ser debido a que la resolución de los dominios en las simulaciones de EUROCORDERX es dos veces mayor que las de ESCENA.

Otro resultado significativo obtenido es que los clústeres de las particiones obtenidas se pueden relacionar con los principales accidentes orográficos de la Península Ibérica y de las Islas Baleares, tal y como se detalla en el punto 3.4.2, reflejando el hecho de que la velocidad del viento en superficie es una variable climática que viene muy afectada por la orografía.

Para la validación del viento simulado en los conjuntos de ESCENA y EUROCORDERX forzados por ERA-Interim se utilizaron los datos de 71 estaciones meteorológicas de la base de datos de ECA&D. Esta validación se basó en la regionalización de las estaciones de ECA&D (obteniendo 9 clústeres). Para comparar las series temporales diarias correspondientes, modeladas y observadas, a cada clúster se utilizó el coeficiente de correlación y el criterio de Perkins entre las funciones distribución de probabilidad. En la mayor parte de los casos se obtuvieron correlaciones superiores a 0,5 con un nivel de confianza superior al 95%.

Para realizar la comparación de las PDFs de la velocidad del viento en superficie de los RCMs y de ECA&D se utilizó el criterio de Perkins, descrito en el punto 3.3, obteniendo la Tabla 4 y la Tabla 5. Dando como resultado que de media los RCMs de EUROCORDERX son capaces de reproducir el 80% de las PDFs de ECA&D, mientras que los RCMs de ESCENA presentan una habilidad del 78%. Lo que muestra que los RCMs utilizados en la tesis son capaces de reproducir en gran medida la distribución de la velocidad del viento de la base de datos tomada como referencia.

Capítulo 6: Conclusiones

Por otro lado, como la resolución del dominio de las simulaciones del proyecto ESCENA es la mitad del de EUROCORDEX, se estudió la posible implicación que puede tener el incremento de la resolución en la precisión de los resultados de los modelos. Obteniéndose que un incremento en la resolución no produce una mejora clara en la correlación media de las series temporales, e incluso podría producir el efecto contrario, ya que para los clústeres próximos a las costas el coeficiente de correlación que presentan los RCMs del proyecto ESCENA es más alto que el de los RCMs del proyecto EUROCORDEX. En lo que respecta al análisis de las PDFs, se obtiene que de media los RCMs del proyecto EUROCORDEX tienen un S_{score} un 2% más alto que los del proyecto ESCENA, aunque esto puede ser debido al clúster 6. Si no se tiene en cuenta el clúster 6 la mejora absoluta del S_{score} de los RCMs del proyecto EUROCORDEX con respecto a los del proyecto ESCENA es de un 6%. Luego a la vista de estos resultados no se puede asegurar que el incremento de la resolución de los RCMs produzca una clara mejoría en la capacidad de estos para simular el viento en superficie.

Para estudiar la evolución de los vientos de la Península Ibérica y de las Islas Baleares durante la primera mitad del siglo XXI se utilizaron las simulaciones de los RCMs del proyecto ESCENA forzados por ECHAM5-MPIOM A1B. La validación de las simulaciones del viento en superficie de estos modelos forzados por ECHAM5-MPIOM para el tiempo presente, mostró que los resultados no eran mucho peores que cuando estos eran forzados por un reanálisis. Por lo que se consideró que RCMs del proyecto ESCENA deberían de ser capaces de simular en gran medida el viento futuro de la primera mitad del Siglo XXI.

En cuanto a la señal climática en las velocidades medias del viento para el periodo 2031-2050, se obtiene una disminución generalizada en toda la Península Ibérica, pero que en ningún caso superó el 3%, siendo esta disminución más acusada en las zonas más alejadas de la influencia atlántica.

La evolución de las series anuales en los clústeres muestra en todos los casos una tendencia negativa, con valores comprendidos entre los $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el clúster 8 y los $3,8 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el clúster 3. Estas tendencias

Capítulo 6: Conclusiones

demuestran una dependencia estacional, y algunos clústeres muestran tendencias positivas durante el Verano. Un caso especial es el clúster 7, que presenta tendencias positivas a lo largo del año excepto en Verano, en el que presenta una fuerte tendencia negativa. Este comportamiento podría deberse al desplazamiento del centro de altas presiones de las Azores que puede producir un debilitamiento de los vientos del Este sobre el Estrecho de Gibraltar. También es interesante observar que hay una clara distribución espacial de las tendencias Oeste-Este, así las regiones más al Oeste tienen tendencias menos negativas que las regiones del Este, esto podría ser debido a la mayor influencia de los vientos del Océano Atlántico sobre las regiones del Oeste.

También se estudiaron las incertidumbres asociadas al forzamiento y las debidas a las diferencias en los RCMs, para lo cual se usaron las simulaciones de los Conjuntos de modelos de EUROCORDEX. Obteniéndose que las simulaciones son más susceptibles a la elección del RCM que a la del forzamiento.

Finalmente, en el Anexo II, se propone una metodología de clasificación climática basada en la metodología desarrollada para el estudio del viento, que podría usarse para disminuir la incertidumbre de las simulaciones asociada a la elección del RCM. Aunque el resultado más importante de esta investigación sería la presentación de un nuevo método para obtener el número de óptimo de clústeres para el método de clasificación K-means.

Anexo I.

Estudio realizado para decidir el método de clasificación a usar: K-means, agrupamiento jerárquico (varianza mínima de Ward), agrupamiento espectral, agrupamiento basado en densidad (Dbscan).

En este punto se expondrá el análisis realizado en el que se explican las razones por qué el método elegido para realizar el estudio de la velocidad del viento en superficie en la Península Ibérica y en las Islas Baleares fue K-means. Para este análisis se utilizaron los resultados de los RCMs del proyecto ESCENA, sobre los que se aplicaron los distintos métodos. Los métodos analizados fueron K-means, agrupamiento jerárquico (varianza mínima de Ward), agrupamiento espectral, agrupamiento basado en densidad (Dbscan):

- Agrupamiento jerárquico (varianza mínima de Ward): La razón, por la que se usó el agrupamiento jerárquico basado en la varianza mínima de Ward, fue debida a que es un método utilizado con frecuencia en climatología para clasificar distintas señales climáticas, [42], [48] y [71]. Para estudiar la conveniencia de usar agrupamiento jerárquico basado en la varianza mínima de Ward, se aplicó el método a los dos Conjuntos de RCMs del proyecto ESCENA, para distintos valores del número final

Anexo I: Estudio realizado para la decisión del método de clasificación a usar

de ramas del dendrograma, o lo que es lo mismo, para distintos valores del número de clústeres. Previamente a la utilización del método de agrupamiento jerárquico, a los datos de los RCMs se le aplicó un análisis de componentes principales.

Entonces, una vez obtenidas las clasificaciones para los distintos modelos de los dos Conjuntos de RCMs de ESCENA para distintos valores del número de clústeres, se aplicó la metodología descrita en el punto 3.4.1, obteniendo dos regionalizaciones de la Península Ibérica y de las Islas Baleares para la velocidad del viento en superficie, Ilustración 29,

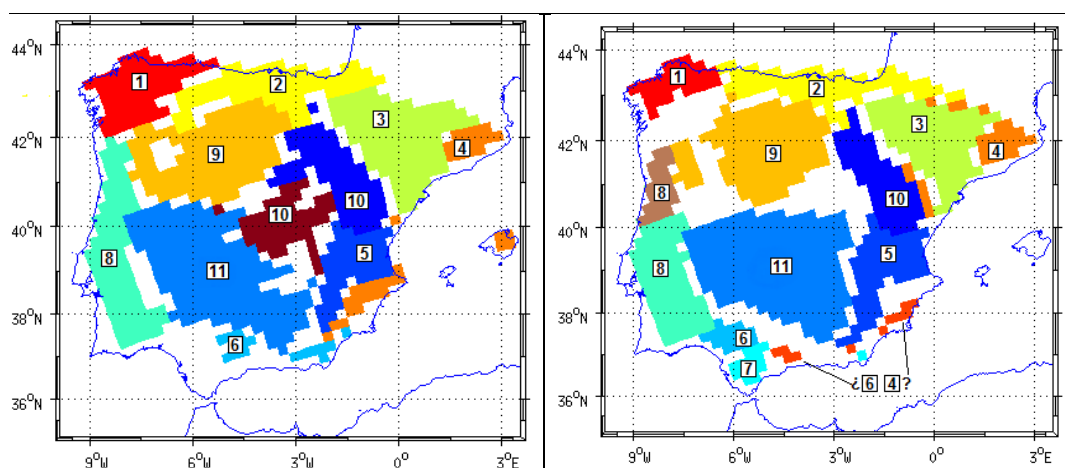


Ilustración 29: Regionalización de la Península Ibérica desde el punto de vista eólico para los modelos del proyecto ESCENA mediante agrupamiento jerárquico basado en la varianza mínima de Ward. Figura de la izquierda: RCMs forzados por ERA-Interim. Figura de la derecha: RCMs forzados por ECHAM5-MPIOM.

Si se compara la Ilustración 29 con la Ilustración 17, se puede ver que en la mayor parte de los casos los clústeres de ambas clasificaciones son fácilmente identificables, solamente hay pequeñas diferencias, como:

El clúster 8 se divide en dos cuando el forzamiento es ECHAM5-MPIOM.

El clúster 10 se divide en dos cuando el forzamiento es ERA-Interim.

Anexo I: Estudio realizado para la decisión del método de clasificación a usar

Cuando se usa ECHAM5-MPIOM como forzamiento, aparece un pequeño clúster que se puede identificar en parte con el cluster 4 y/o el clúster 6 de la Ilustración 17.

Cuando se usa como forzamiento ERA-Interim desaparece el clúster 7 de la Ilustración 17.

La numeración utilizada para la identificación de los clústeres en la Ilustración 29 sigue la empleada en la Ilustración 17.

Aún así, la regionalización obtenida usando métodos de agrupamiento jerárquico presenta algunos problemas que no tiene la obtenida a partir de K-means, por ejemplo:

El número óptimo de clústeres no es el mismo para los RCMs forzados por ERA-Interim (11) que para los RCMs forzados por ECHAM5-MPIOM (13).

El número de puntos clasificados es menor en las regionalizaciones obtenidas aplicando el método de agrupamiento jerárquico que en las regionalizaciones obtenidas empleando K-means. Así el número de puntos clasificados cuando se usa K-means es un 10% mayor cuando el forzamiento es ERA-Interim y un 14% cuando el forzamiento es ECHAM5-MPIOM.

Principalmente por estas razones se decidió usar K-means en lugar de la técnica de agrupamiento jerárquico basado en la varianza mínima de Ward.

- Agrupamiento espectral: Al igual que para la técnica de agrupamiento jerárquico, para estudiar si el agrupamiento espectral era el que daba mejores resultados, se aplicó este método sobre los dos conjuntos de RCMs del proyecto ESCENA. Tal como se explica en el punto 2.1, el método espectral es bastante parecido al que se empleó para K-means, solamente que el análisis espectral no se aplica directamente sobre los datos de los RCMs si no sobre una matriz de similitud de puntos, y para crear esa matriz hay que definir el criterio de similitud que

Anexo I: Estudio realizado para la decisión del método de clasificación a usar

mide la afinidad de los puntos. Dos de los criterios más usados habitualmente para pesar la similitud entre puntos son la gaussiana y la inversa de la distancia entre puntos, que fueron los criterios que se usaron en esta tesis.

$$\text{Gausiana: } S_{ij} := e^{-\frac{d(x_i, x_j)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\text{Distancia inversa: } S_{ij} = \frac{1}{1+d(x_i, x_j)^2}$$

Donde $d(x_i, x_j)$ es la distancia Euclídea y σ es el parámetro que define el tamaño de la vecindad

En la Ilustración 30 se representa gráficamente los criterios ya parametrizados que se usaron en esta tesis, como se puede apreciar tienen una gran similitud.

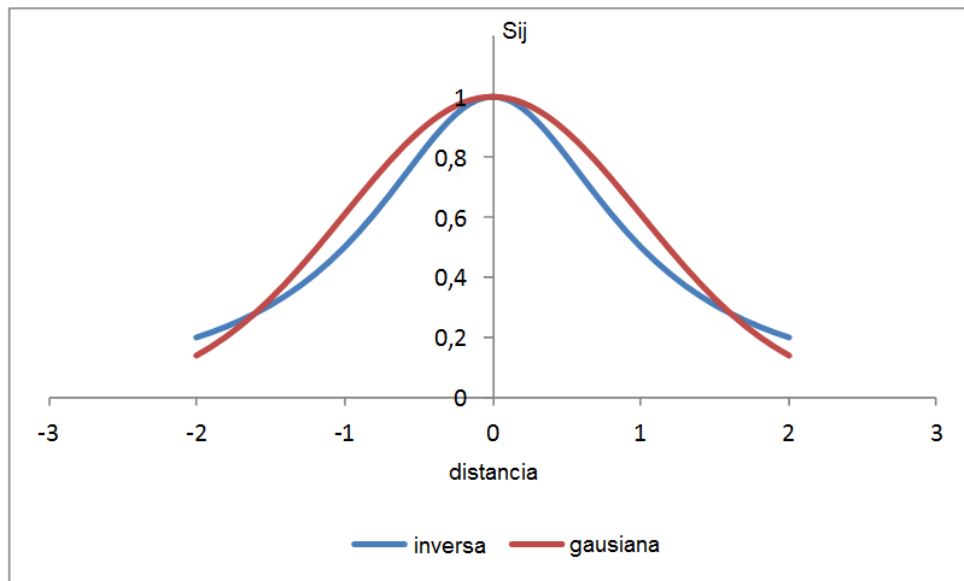


Ilustración 30: Representación gráfica de los criterios utilizados en esta tesis para obtener las matrices de similitud del método de agrupamiento espectral para los Conjuntos de RCMs del proyecto ESCENA.

Una vez calculadas las matrices de similitud para cada uno de los RCMs, tal y como se explica en el punto 2.1, el método de agrupamiento espectral calcula para cada RCM la matriz de autovectores, y es sobre esta matriz sobre la que se aplica algún criterio de clasificación, que en muchos casos, al igual que en esta tesis, es K-means. Luego aplicando

Anexo I: Estudio realizado para la decisión del método de clasificación a usar

K-means para distintos números de clústeres, desde 5 a 16, se obtuvieron para cada RCM de los Conjuntos de ESCENA 12 regionalizaciones distintas, para obtener la regionalización óptima para cada Conjunto, de RCMs del proyecto ESCENA se usó la metodología descrita en el punto 3.4.1, obteniéndose las siguientes regionalizaciones, la Ilustración 31 y la Ilustración 32:

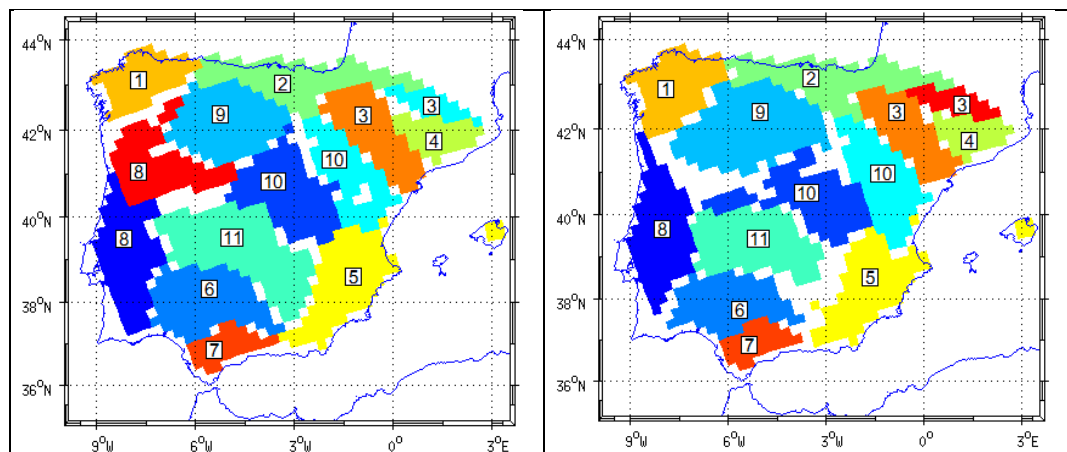


Ilustración 31: Regionalización de la Península Ibérica desde el punto de vista eólico para los modelos del proyecto ESCENA mediante agrupamiento espectral utilizando como criterio de similitud la métrica Gausiana. Figura de la izquierda: RCMs forzados por ERA-Interim. Figura de la derecha: RCMs forzados por ECHAM5-MPIOM.

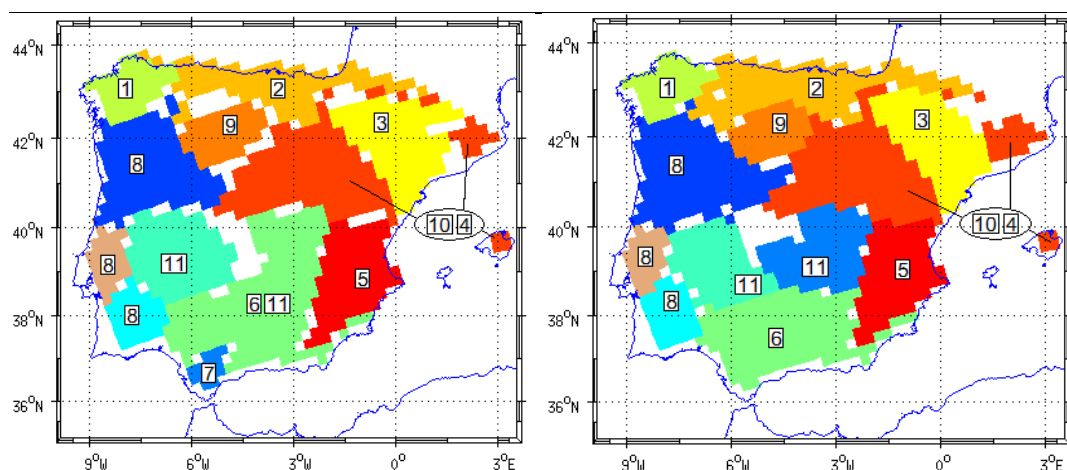


Ilustración 32 : Regionalización de la Península Ibérica desde el punto de vista eólico para los modelos del proyecto ESCENA mediante agrupamiento espectral utilizando como criterio de similitud la métrica inversa de la distancia. Figura de la izquierda: RCMs forzados por ERA-Interim. Figura de la derecha: RCMs forzados por ECHAM5-MPIOM.

Anexo I: Estudio realizado para la decisión del método de clasificación a usar

Al igual que para las regionalizaciones obtenidas utilizando el método de agrupamiento jerárquico, la numeración utilizada para la identificación de los clústeres en la Ilustración 31 y la Ilustración 32 sigue la empleada en la Ilustración 17. Si se estudia la Ilustración 31 y la Ilustración 32, se puede apreciar que gran parte de los clústeres obtenidos se pueden identificar de manera sencilla con los de la Ilustración 17, dicha identificación se realizó de manera subjetiva sin utilizar ningún criterio matemático. Aún así hay diferencias entre las regionalizaciones obtenidas utilizando el método de K-means y el de agrupamiento espectral:

Métrica Gausiana:

ERA-Interim: El clúster 8 y 10 están divididos en dos.

ECHAM5-MPIOM: El clúster 3 y 10 están divididos en dos.

Métrica inversa de la distancia:

ERA-Interim: El clúster 4 y 10 al igual que el clúster 6 y 11 están unidos, y el clúster 8 está dividido en tres partes.

ECHAM5-MPIOM: El clúster 4 y 10 están unidos, el clúster 11 está dividido en dos partes, el clúster 8 está dividido en tres partes y desaparece el clúster 7.

Ahora, si se comparan las regionalizaciones obtenidas utilizando el método de agrupamiento espectral, se puede ver que hay determinados problemas que no presenta las regionalizaciones obtenidas utilizando el método K-means, Ilustración 17, por ejemplo:

El número óptimo de clústeres que presentan las regionalizaciones cuando se usa la métrica Gaussiana es 12 tanto para los RCMs forzados por ERA-Interim como para los forzados por ECHAM5-MPIOM, pero la forma de conseguir este número es distinta. En el caso de los RCMs forzados por ERA-Interim el clúster 8 está

Anexo I: Estudio realizado para la decisión del método de clasificación a usar

dividido en dos, mientras que para los RCMs forzados por ECHAM5-MPIOM es el clúster 3 el que está dividido en dos.

Cuando se usa la métrica de la inversa de la distancia el número óptimo de clústeres es 13, pero la forma de conseguirlos varía. Así la regionalización obtenida por los RCMs forzados por ERA-Interim, hay clúster 7 y parte del clúster 11 y el clúster 6 están unidos, mientras que para la regionalización de los RCMs forzados por ECHAM5-MPIOM, el clúster 6-11 se divide en dos, y el 7 desaparece.

Si se comparan las regionalizaciones obtenidas para ambas métricas, se puede ver fácilmente que hay diferencias, para empezar el número óptimo de clústeres no es el mismo para la métrica Gaussiana (12 clústeres) que para la métrica la inversa de la distancia. Lo que muestra que la solución del agrupamiento espectral tiene dependencia con la métrica elegida, problema que no muestra el método K-means.

Luego por estas razones se decidió usar K-means en lugar de la técnica de agrupamiento espectral.

- Agrupamiento basado en densidad (DBSCAN): Para analizar los pros y los contras que presentaba esta metodología, se trató de aplicar a los resultados de los dos conjuntos de RCMs del proyecto ESCENA, después de realizar un análisis de componentes principales, se utilizaron las 15 primeras componentes principales. Mostrando este método resultados sin sentido, ya que dio como solución un único clúster cubriendo todo el área de estudio.

Estos resultados sólo muestran la poca idoneidad de este método para estudiar conjuntos de datos multidimensionales, tal y como se indica en [53], [54], [55] y [56].

Anexo I: Estudio realizado para la decisión del método de clasificación a usar

Luego a la vista de estos resultados se concluye que el método de agrupamiento de los estudiados que mejor se ajusta a las necesidades de la tesis es K-means.

Anexo II.

Metodología Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática Velocidad del Viento en Superficie Debida a la Elección de RCM

Tal como se muestra en el punto Capítulo 5, parece ser que la mayor parte de la incertidumbre de la variable climática, velocidad del viento en superficie, es debida a la elección del RCM usado. En este punto se propone una metodología para elegir cuál es el RCM, que es esperable que sus resultados sean los más próximos a la realidad. Esta es una investigación abierta en la hay todavía cuestiones por concretar, lo que se pretende es presentar los resultados obtenidos.

Se supone que los Modelos Climáticos Regionales han de ser capaces de reproducir los principales procesos climáticos que ocurren en la región que están simulando, luego se establece la hipótesis que el RCM que dará el campo de velocidades de viento en superficie más parecido a la realidad para una zonas será aquel que es capaz de reproducir mejor el clima de esa zona. Para evaluar la capacidad de los modelos de reproducir el clima de una zona hay diversas formas de hacerlo. La más utilizada consiste en la comparación de diversas estadísticas de los resultados de los modelos con las de los datos medidos, tal y como se ha hecho en esta tesis con la velocidad del viento en

Anexo II: Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática

superficie o en otros trabajos como [72], [73] y [74]. Desafortunadamente esta metodología exige la necesidad de calcular una serie de mapas por variable, periodo y modelo para posteriormente obtener los estadísticos correspondientes y compararlos con los datos reales.

En [75] se propone una alternativa a esta metodología, que consisten combinar en un único mapa los regímenes de temperatura y precipitación, usando una clasificación climática de las existentes. Esto simplificaría el estudio, ya que los RCMs deberían de reproducir las zonas climáticas. Esta metodología de usar clasificaciones climáticas para evaluar la capacidad de los modelos climáticos para reproducir el clima de una zona ha sido usada por diversos autores. Por ejemplo, [76] usa la clasificación climática de Köppen para estudiar la capacidad de un modelo global para simular el clima actual y como el cambio climático puede afectar a las distintas regiones climáticas de larga-escala. [77] estudia las distribuciones futuras de las biomas (área climática) a nivel global debido al cambio climático, para lo que usa distintas clasificaciones climáticas. [78] para estudiar cómo han variado las formas de las regiones de los distintos climas en los continentes en el periodo 1901-1995 utiliza la clasificación climática de Köppen. [79] utilizó la clasificación de Köppen para estudiar la variación del clima ártico durante la segunda mitad del siglo XX.

Las clasificaciones climáticas más profusamente usadas están basadas en algoritmos que establecen relaciones entre las zonas climáticas y distintos tipos de vegetación, así entre este tipo de clasificaciones climáticas se podrían citar entre otras en orden cronológico las siguientes, la de Köppen (1936), Holdridge (1947), Thorthwaite (1948), Budyko (1986), Prentice et al. (1992). Aunque según [80] y [81] la clasificación climática que es usada con mayor frecuencia sería la de Köppen. A lo largo de la historia el algoritmo de clasificación original de Köppen ha sufrido pequeñas propuestas de mejora pero en esencia ha permanecido inalterable. Esto se puede apreciar por ejemplo en [82], que para obtener el Atlas Climático Ibérico (2011) se sigue el esquema propuesto en la clasificación de Köppen-Geiger, con la salvedad que se eligió como límite de temperatura para separar los climas templados C y D los 0°C, en lugar de los -3,0°C originales, siguiendo el consejo de autores como Russel, Trewartha, Critchfield,... repitiendo el esquema utilizado en la clasificación climática del

Anexo II: Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática

Atlas Nacional de España (2004), mientras que el Instituto de Meteorología de Portugal siempre había utilizado hasta ahora la clasificación clásica de Köppen.

Por otro lado teniendo en cuenta que el objetivo de una clasificación climática es la división de una región en zonas con condiciones climáticas parecidas, se puede apreciar que el método de clasificación K-means encaja perfectamente dentro de este cometido. Por lo que para obtener una clasificación climática de la Península Ibérica y de las Islas Baleares que pudiera ser utilizada como base para validar los resultados de los RCMs utilizando como método de clasificación K-means, de forma que los tipos de clima sean lo más parecidos a los de Köppen-Geiger, las variables sobre las que se aplicó K-means se restringieron a las que se usan para obtener la clasificación climática de Köppen-Geiger tal y como vienen definidas en [83]:

- MAP (mm): Precipitación anual media.
- MAT (mm): Temperatura anual media.
- T_{hot} (°C): Temperatura del mes más caliente.
- T_{cold} (°C): Temperatura del mes más frío.
- T_{mon10} : número de meses con temperatura media por encima de 10°C.
- P_{dry} (mm): Precipitación del mes más seco.
- P_{sdry} (mm): Precipitación del mes más seco en verano (Abril-Septiembre).
- P_{wdry} (mm): Precipitación del mes más seco en invierno (Octubre-Marzo).
- P_{swet} (mm): Precipitación del mes más húmedo en verano (Abril-Septiembre).
- P_{wwet} (mm): Precipitación del mes más húmedo en invierno (Octubre-Marzo).
- $P_{threshold}$ (mm): nivel de precipitación, su valor viene dado de la siguiente forma si el 70% del MAP se da en invierno, entonces $P_{threshold}=2 \times MAT$, si el 70% del MAP se da en verano, entonces el $P_{threshold}=2 \times MAT + 28$, en el resto de los casos $P_{threshold}=2 \times MAT + 14$

Para calcular estas variables se utilizaron los datos de temperatura media, máxima, mínima y precipitación que vienen recogidos en E-OBS gridded dataset de ECA&D. El E-OBS gridded dataset es el conjunto de datos de temperatura media, máxima, mínima y precipitación para Europa y el periodo 1950-2006 de ECA&D, los datos se presentan en cuatro resoluciones escogiéndose para este estudio la resolución 0,22°x0,22°. Una descripción detallada de esta base de datos viene recogida en la Ref. [84]. Una vez

Anexo II: Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática

obtenidos estos datos con paso de tiempo diario, se calculó la climatología de un año tipo para la temperatura media, máxima, mínima y la precipitación con paso de tiempo mensual, y a partir de este año tipo se obtuvieron las variables descritas en los puntos del párrafo anterior (MAP, MAT, T_{hot} , T_{cold} , T_{mon10} , P_{dry} , P_{sdry} , P_{wdry} , P_{swet} , P_{wwet} , $P_{threshold}$).

Una vez obtenidas esas variables se normalizaron a la unidad, consiguiendo que todas las variables pesasen lo mismo, y se formó una matriz formada por 11 columnas, una por variable, y tantas filas como puntos tenía el grid de los datos de E-OBS gridded dataset, para el dominio estudiado. Se obtuvieron dos matrices una para cada uno de los dominios estudiados, un dominio correspondía a Europa incluyendo todos los puntos de E-OBS grided dataset, y el otro estaba centrado en la Península Ibérica, .

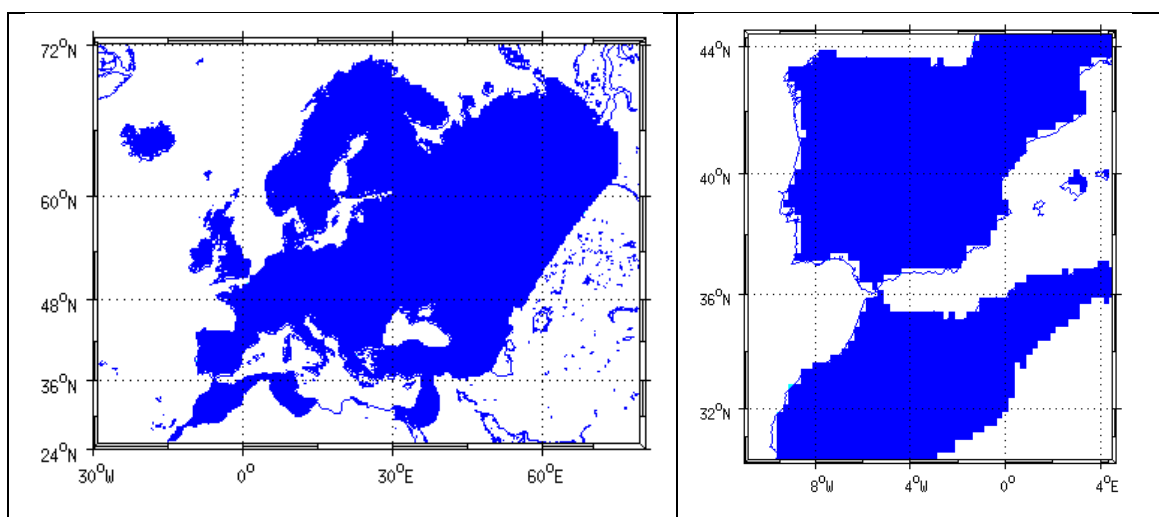


Ilustración 33 : Dominios usados para obtener una clasificación climática para la Península Ibérica. Figura de la izquierda: Dominio Europa. Figura de la Derecha: Dominio Península Ibérica.

Una vez obtenidas las dos matrices se aplicó directamente sobre ellas K-means, como el número óptimo de clústeres es un valor que se desconoce a priori, se varió este de 1 a 20, obteniendo 20 clasificaciones climáticas distintas para los dos dominios. Para cada clasificación el método K-means iteró 30000 veces con el objeto de asegurarnos que las soluciones obtenidas habían convergido al mínimo global o estaban próximas a este.

Actuando de esta forma se obtuvieron 20 clasificaciones climáticas para el dominio de Europa y otras 20 para el dominio de la Península Ibérica.

Anexo II: Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática

Entonces para encontrar la clasificación climática para la Península Ibérica, se consideró que esta debería de ser independiente del dominio, o lo que es lo mismo la clasificación climática para la Península Ibérica utilizando el dominio de Europa debería de converger a una solución similar a la clasificación climática para la Península Ibérica usando el dominio de la Península Ibérica. Luego para poder comparar las clasificaciones climáticas para la Península Ibérica para ambos dominios se recortó el dominio de Europa al dominio de la Península Ibérica, obteniendo la Ilustración 1.

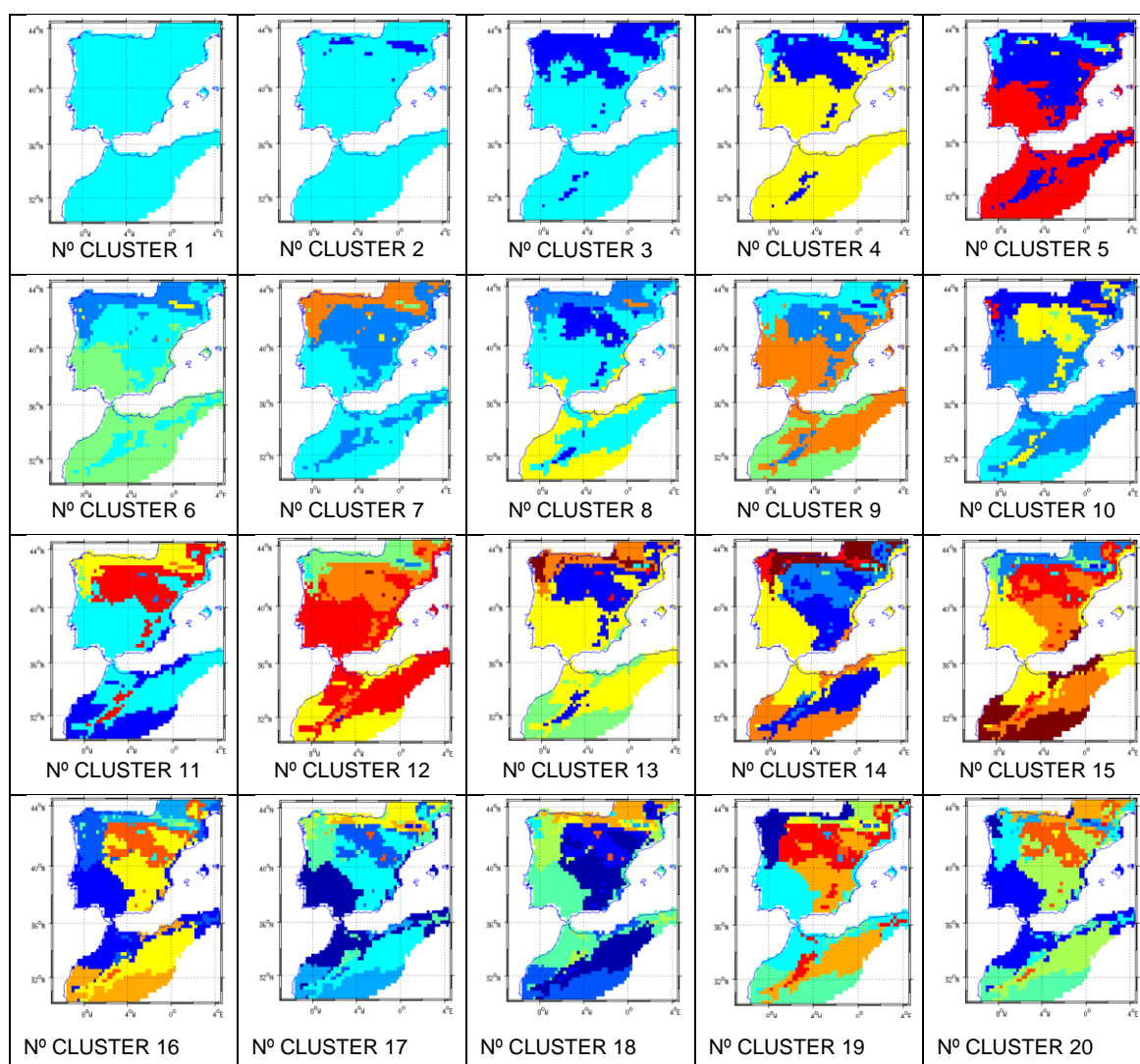


Ilustración 34 : Conjunto de clasificaciones climáticas para la Península Ibérica usando el dominio Europa.

Las 20 clasificaciones climáticas obtenidas usando el dominio Península Ibérica vienen recogidas en la Ilustración 35.

Anexo II: Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática

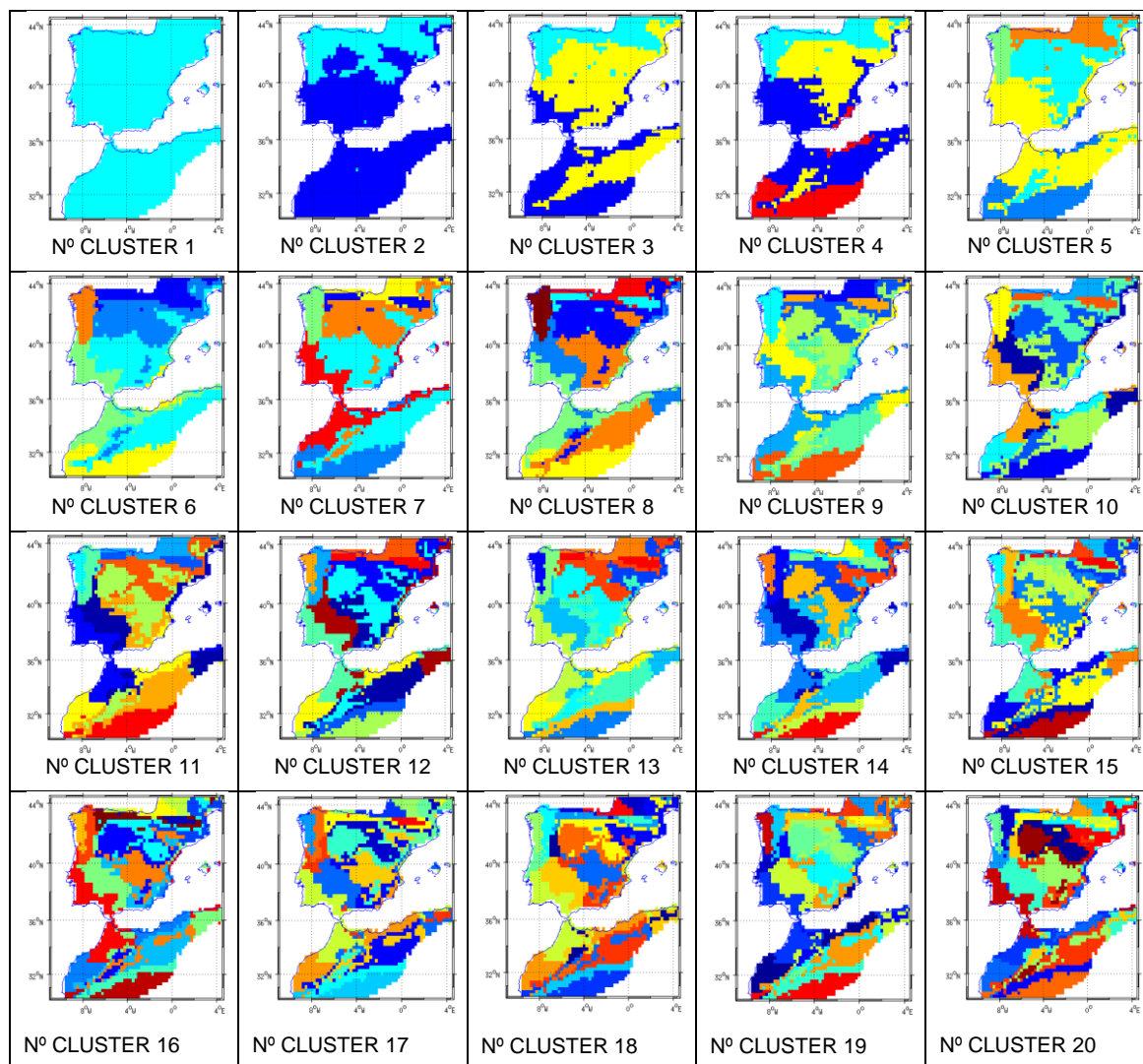


Ilustración 35 : Conjunto de clasificaciones climáticas para la Península Ibérica usando el dominio Península Ibérica.

Una vez obtenidos los dos conjuntos de clasificaciones climáticas para la Península Ibérica. Se trató de determinar, cogiendo como referencia el conjunto de clasificaciones obtenidas a partir del dominio Europa, cuál de las clasificaciones del dominio Península Ibérica presenta un mayor parecido con alguna de las clasificaciones del dominio Europa. Pero teniendo en cuenta que el método K-means solamente por el hecho de clasificar da un conjunto de clústeres, y estos clústeres de por sí también tiene un parecido con las clasificaciones tomadas como referencia, se decidió utilizar un criterio que midiese la significancia del parecido, por ejemplo las clasificaciones climáticas formadas con 1 clúster son las que más se parecen entre sí, pero este parecido no tiene significado porque el método K-means daría en este caso siempre la misma solución independientemente del número de iteraciones. Por lo que para

Anexo II: Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática

decidir cuál de las clasificaciones de los dos dominios se debería tomar como el clima para la Península Ibérica se decidió definir un criterio que midiese la significancia del parecido:

$$significancia_parecido = \frac{Parecido_PI - Parecido_aleatorio}{1 - Parecido_aleatorio}$$

Donde:

Parecido_PI: Es el parecido en tantos por uno entre las clasificaciones del dominio Península Ibérica y las clasificaciones del dominio Europa. Para obtener el parecido entre dos clústeres uno de una clasificación del dominio Europa y otro otra clasificación climática del dominio Península Ibérica, se coge el clúster de la clasificación de referencia y se obtiene el clúster equivalente de la otra clasificación que es con el que comparte más puntos, se calculan los puntos que tienen en común y se obtienen dos cocientes, uno se obtiene dividiendo el número de puntos en común entre el número de puntos totales del clúster de la clasificación de referencia y el otro sale de dividir el número de puntos en común entre el número de puntos totales del clúster de la clasificación del dominio de la Península Ibérica. De estos dos cocientes se escoge el más pequeño, siendo este valor el que define el parecido entre clústeres. Esto se repite para todos los clústeres de la clasificación de referencia. Para obtener el parecido entre clasificaciones se hace la media ponderada de los cocientes escogidos por clúster en función del tamaño que tiene el clúster respecto al área total de clústeres. Esto se repite para cada clasificación climática del dominio Europa con cada clasificación climática del dominio Península Ibérica obteniendo una matriz 20x20.

Parecido_aleatorio: Se define de igual forma que el Parecido_IP, sólo que en este caso se sustituye las clasificaciones del dominio Península Ibérica, por otro conjunto de clasificaciones climáticas aleatorias. Para obtener las clasificaciones climáticas aleatorias se aplicó el

Anexo II: Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática

método K-means sobre los datos del dominio Península Ibérica pero se hizo que solo iterase una vez, esto se hizo 100 veces para cada número de clústeres, y el número de clústeres se varió de 1 a 20 obteniendo 2000 clasificaciones climáticas aleatorias. Para calcular el Parecido aleatorio se cogió por número de clúster las clasificaciones aleatorias que presentaba el quinto mejor valor Parecido_aleatorio con respecto a las clasificaciones de referencia, es decir para cada número de clúster de la clasificación de referencia podía variar la clasificación climática aleatoria escogida, resultando una matriz de 20x20.

Luego utilizando el criterio *significancia_parecido* se obtuvo la Ilustración 36 y la Tabla 19.

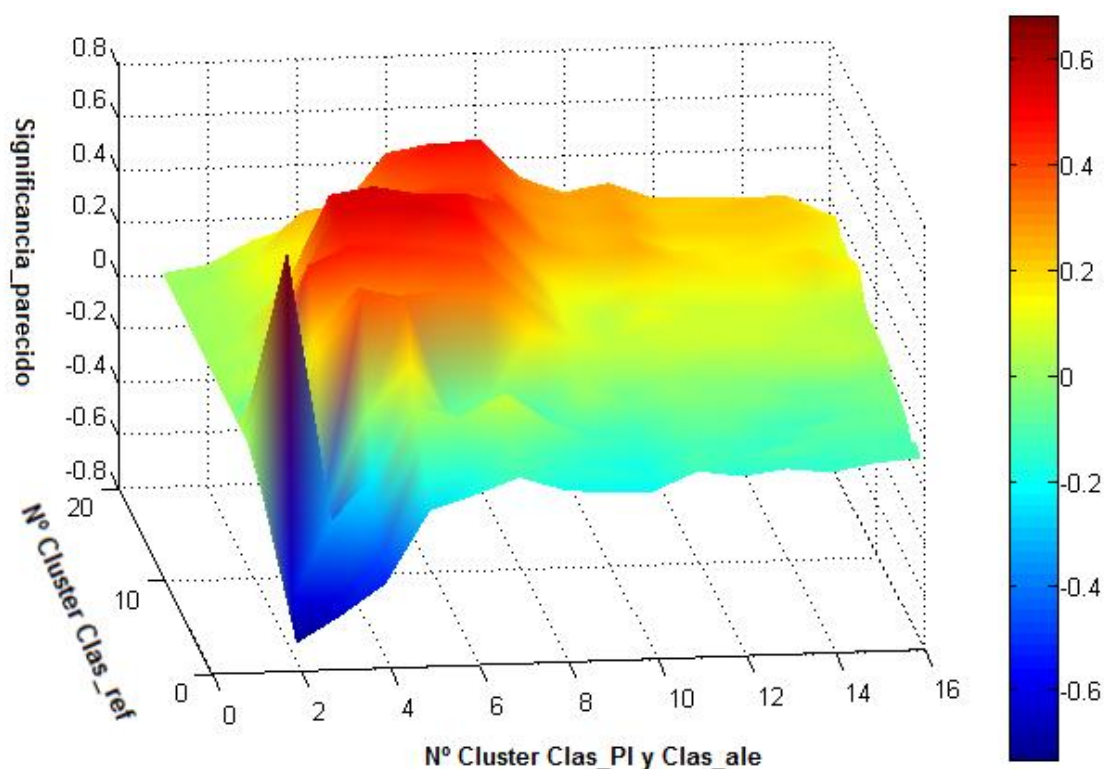


Ilustración 36 : Representación gráfica de los valores obtenidos para el criterio *significancia_parecido*, para las 15 primeras clasificaciones climáticas del dominio Península Ibérica.

Anexo II: Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática

		Nº Cluster Clas_PI y Clas_ale									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nº Cluster Clas_ref	1	0,000	-0,731	-0,633	-0,519	-0,247	-0,196	-0,135	-0,188	-0,206	-0,205
	2	0,000	-0,601	-0,608	-0,472	-0,172	-0,162	-0,076	-0,151	-0,151	-0,176
	3	0,000	0,679	-0,345	-0,334	-0,075	-0,128	-0,032	-0,129	-0,174	-0,199
	4	0,000	0,304	-0,498	-0,225	0,035	-0,004	0,078	-0,037	-0,128	-0,148
	5	0,000	-0,357	-0,400	-0,017	0,158	-0,217	-0,086	-0,198	-0,129	-0,118
	6	0,000	-0,144	0,181	0,390	0,348	-0,089	-0,035	-0,122	0,002	-0,063
	7	0,000	-0,142	0,192	0,386	0,350	-0,089	-0,035	-0,113	0,003	-0,062
	8	0,000	0,068	0,443	0,297	0,317	0,331	0,310	0,152	0,025	0,000
	9	0,000	0,039	0,327	0,469	0,450	0,432	0,407	0,247	0,096	0,043
	10	0,000	0,039	0,318	0,447	0,450	0,434	0,405	0,247	0,094	0,044
	11	0,000	0,042	0,207	0,537	0,545	0,528	0,495	0,326	0,122	0,059
	12	0,000	0,038	0,202	0,531	0,544	0,530	0,494	0,326	0,121	0,061
	13	0,000	0,025	0,181	0,524	0,551	0,516	0,513	0,340	0,161	0,121
	14	0,000	0,028	0,081	0,291	0,310	0,345	0,337	0,433	0,267	0,222
	15	0,000	0,026	0,084	0,291	0,308	0,327	0,333	0,432	0,268	0,223
	16	0,000	0,031	0,120	0,195	0,204	0,402	0,418	0,409	0,279	0,231
	17	0,000	0,026	0,110	0,173	0,187	0,371	0,411	0,410	0,292	0,245
	18	0,000	0,026	0,108	0,169	0,182	0,392	0,431	0,428	0,303	0,254
	19	0,000	0,017	0,097	0,249	0,276	0,427	0,486	0,500	0,305	0,269
	20	0,000	0,026	0,112	0,163	0,181	0,424	0,453	0,435	0,316	0,253

Tabla 19: Valores numéricos obtenidos para el criterio significancia_parecido, para las 15 primeras clasificaciones climáticas del dominio Península Ibérica.

Entonces si se estudia la Tabla 16, se puede ver que el valor más alto del criterio significancia_parecido corresponde con la clasificación climática de referencia obtenida para 3 clústeres y la clasificación climática del dominio Península Ibérica para 2 clústeres, Ilustración 37.

Como se puede apreciar a simple vista las clasificaciones climáticas obtenidas para el dominio Europa y número de clústeres=3 y la clasificación climática para el dominio Península Ibérica y número de clústeres=2 tienen un gran parecido, si se cuantifica dicho parecido a través del parámetro Parecido_PI, se obtiene que este vale 0,9382, como se puede apreciar da un valor muy próximo a 1 que sería el caso en que fuesen totalmente coincidentes. Se puede apreciar que la solución obtenida divide el clima de la Península Ibérica en dos zonas una Norte y otra Sur.

Anexo II: Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática

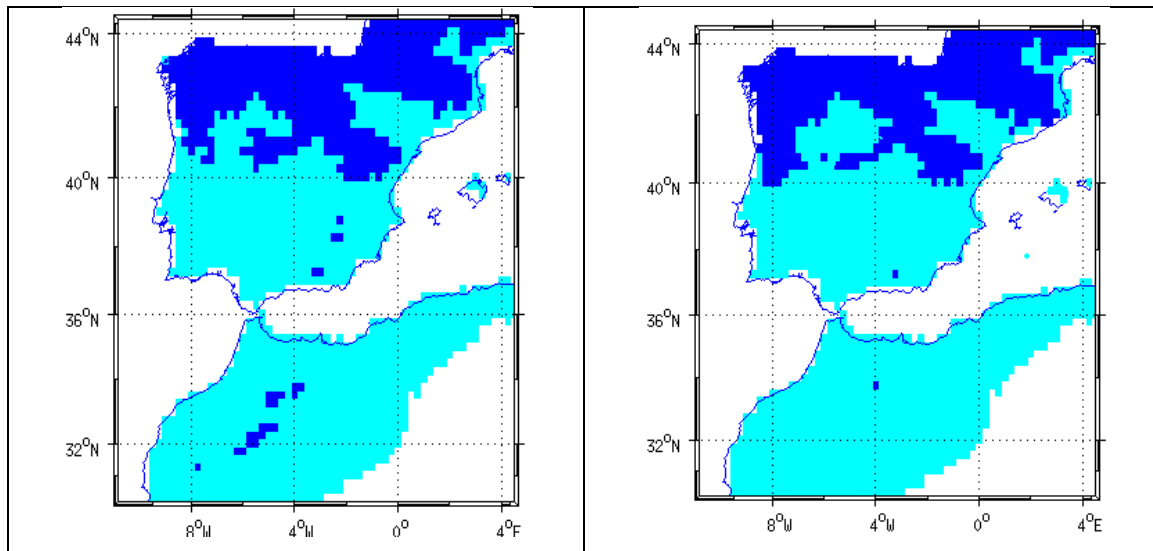


Ilustración 37 : Figura de la izquierda clasificación climática de referencia para número de clústeres=3. Figura de la izquierda clasificación climática de referencia para número de clústeres=2.

Como se consideró que la división de la Península Ibérica en sólo dos tipos de clima, es una solución muy simple, se buscaron las clasificaciones climáticas para el dominio Europa y el dominio Península Ibérica que daban el segundo valor más alto para el parámetro `significancia_parecido`. Encontrándose que son las correspondientes al número de clúster 13 para la clasificación climática del dominio Europa y al número de clúster 5 para la clasificación climática del dominio Península Ibérica, Ilustración 38.

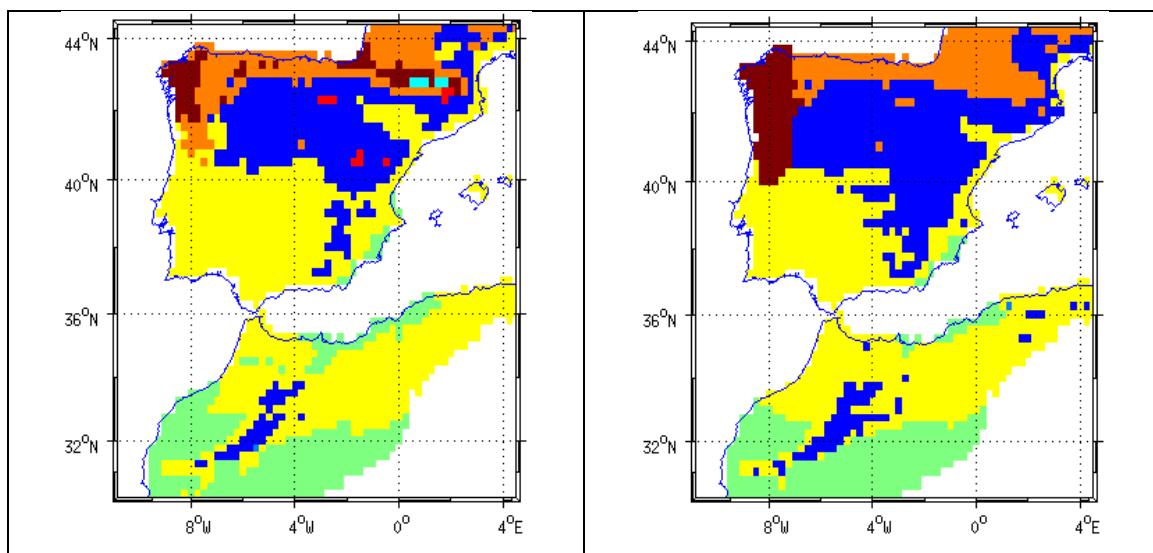


Ilustración 38 : Figura de la izquierda clasificación climática de referencia para número de clústeres=13. Figura de la izquierda clasificación climática de referencia para número de clústeres=5.

Anexo II: Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática

Como se puede apreciar las clasificaciones climáticas de la Ilustración 38 también presentan un gran parecido. Si se utiliza el parámetro Parecido_Pi para cuantificar dicho parecido se obtiene 0.7649. Luego según estos resultados se obtiene que el clima de la Península Ibérica estaría compuesta por 5 grandes zonas climáticas si sólo se tiene en cuenta los datos del dominio Península Ibérica, ahora si el área utilizada para calcular los climas se extiende a la dada por el dominio Europa, aparecen dos zonas climáticas más pero que ocupan áreas muy pequeñas con respecto a las cinco anteriores.

Luego considerando válida la hipótesis, de que el RCM que mejor ha de simular el campo de velocidades del viento en superficie de una región ha de ser aquel que represente mejor las zonas climáticas de esa región. Se propone las zonas climáticas que aparecen en la Ilustración 38, como regla para medir qué RCM simula mejor el clima de la Península Ibérica y por lo tanto simularía mejor el campo de vientos de la Península Ibérica.

Esta es una investigación abierta, en la que la hipótesis fundamental en la que se basa *“como las variables climáticas están relacionadas entre sí, se supone que el RCM que sea capaz de simular mejor el clima de una zona debería de ser el que mejor reprodujese también el campo de vientos de esa zona”* no está probada, esto sería un objetivo para futuras investigaciones. Pero como esta investigación salió de forma natural a raíz del estudio llevado a cabo en el Capítulo 5, y además se consideró que la metodología desarrollada para obtener el número óptimo de clústeres tiene interés desde el punto de vista científico, se decidió incluirla dentro de esta tesis.

Bibliografia.

- [1] Global Wind Energy Council. Global Wind Report Annual Market Update 2015.
- [2] REN21, 2016. Renewables 2016 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat), ISBN 978-3-9818107-0-7.
- [3] Arvizu, D., T. Bruckner, H. Chum, O. Edenhofer, S. Estefen, A. Faaij, M. Fischedick, G. Hansen, G. Hiriart, O. Hohmeyer, K. G. T. Hollands, J. Huckerby, S. Kadner, A. Killingtveit, A. Kumar, A. Lewis, O. Lucon, P. Matschoss, L. Maurice, M. Mirza, C. Mitchell, W. Moomaw, J. Moreira, L. J. Nilsson, J. Nyboer, R. Pichs-Madruga, J. Sathaye, J. Sawin, R. Schaeffer, T. Schei, S. Schlömer, K. Seyboth, R. Sims, G. Sinden, Y. Sokona, C. von Stechow, J. Steckel, A. Verbruggen, R. Wiser, F. Yamba, T. Zwickel, 2011: Technical Summary. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation[O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [4] Wind Energy Scenarios for 2030. A report by the European Wind Energy Association – August 2015
- [5] Paquete Sobre la Unión de la Energía. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo, al Comité de las Regiones y al Banco Europeo de Inversiones. Estrategia Marco para una Unión de la Energía resiliente con una política climática prospectiva. Comisión Europea. Bruselas, 25.2.2015. COM(2015) 80 final.
- [6] S.C. Pryor, R.J. Barthelmie Climate Change Impacts On Wind Energy: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 430-437.
- [7] Murphy J. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. 1999, Journal of Climate, 12:2256-2284
- [8] Wilby RL., Wigley TML. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. 1997, Progress in Physical Geography 21:530-548.

- [9] Giorgi F., Shields Brodeur C., Bates GT., Regional climate change scenarios over the United States produced with a nested regional climate model. 1994, Journal of Climate 7:375-399
- [10] Christensen JH., Carte TR., Rummukainen M., Amanatidis G., Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE Project. Climate Change 81:1-6
- [11] Laprise R. 2008. Regional climate modeling. Journal of Computational Physics 227 (2008) 3641-3666
- [12] Rummukainen M. 2010 State of the art with regional climate models. John Wiley & Sons, Ltd. WIREs Clim Change 2010 1 82-96
- [13] Giorgi F and Mearns L. O. 1999 Introduction to special section: regional climate modeling revisited Journal of Geophysical Research, Vol. 104, NO. D6, PAGES 6335-6352, March 27, 1999
- [14] http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
- [15] Feser F., Rockel B., von Storch H., Winterfeldt J., Zahn M. Regional climate models add value global model data, a review and selected examples. American Meteorological Society 2011. DOI:10.1175/2011BAMS3061.1
- [16] Fonseca, D., Carvalho, M.J., Marta-Almeida, M., Melo-Gonçalves, P., Rocha, A., Recent trends of extreme temperature indices for the Iberian Peninsula, Physics and Chemistry of the Earth (2016), doi: 10.1016/j.pce.2015.12.005
- [17] A.F. Pereira de Lucena et Al. The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. Renewable Energy 2010; 35:904-912.
- [18] Gerraud R.D., Falvey M. The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. International Journal of Climatology. 2009; 29:543-54
- [19] Brewslow P.B., Sailor D.J. Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States. Renewable Energy 2002;27:585-98
- [20] Pryor S. C., Barthelmie R. J., Schoof J. T. Past and future wind climates over the contiguous USA based on the North American Regional Climate Change Assessment Program model Suite. 2012. Journal of Geophysical Research, Vol. 117, D19119, doi:10.1029/2012JD017449
- [21] Sailor D.J., Smith M., Hart M. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. Renewable Energy 2008; 2393-406.
- [22] Stadler S., Dryden J. M., Greene J. S. Climate change impacts on Oklahoma wind resources potential energy output changes. Resources 2015, 4, 203-226; doi:10.3390/resources4020203

- [23] Jiang Ying, Luo Yong, and Zhao Zongci, 2013: Maximum wind speed changes over China. *Acta Meteor. Sinica*, 27(1), 63-74, doi: 10.1007/s13351-013-0107-x
- [24] Chang T-J., Chen C-L., Tu Y-L., Yeh H-T., Wu Y-T. Evaluation of the climate change impact on wind resources in Taiwan Strait. *Energy Conversion and Management* 95 (2015) 435-445
- [25] Fant C., Scholessor C. A., Strzepek K.. The impact of climate change on wind and solar resources in southern Africa. *Applied Energy* 161 (2016) 556-564. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.042>
- [26] S. C. Pryor, R. J. Barthelmie, E. Kjellström. Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model. *Climate Dynamics* (2005) 25:815-835 DOI 10.1007/s00382-005-0072-x
- [27] A. Bloom, V. Kotroni, K. Lagouvardos. Climate change impact of wind energy availability in the Eastern Mediterranean using the regional climate model PRECIS. 2008, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 1249-1257, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/8/1249/2008/
- [28] S.C. Pryor, J. T. School, and R. J. Barthelmie. Winds of change?: Projections of near-surface winds under climate change scenarios. 2006, *Geophysical Research Letters*, Vol 33, L11702, doi:10.1029/2006GL026000
- [29] Barstad I., Sorteberg A., dos-Santos Mesquita M. Present and future offshore wind power potential in northern Europe based on downscaled global climate runs with adjusted SST and sea ice cover. 2012, *Renewable Energy*, di:10.1016/j.renene.2012.02.008
- [30] Pryor S. C., Schoof J. T., Barthelmie R. J. Climate change impacts on wind speeds and wind energy density in northern Europe: empirical downscaling of multiple AOGCMs. 2005, *Climate Research* Vol.29:183-198
- [31] Hueging H., Haas R., Born K., Jacob D., Pinto J. G. Regional changes in wind energy potential over Europe using regional climate model ensemble projections. 2013, *Journal of applied meteorology and climatology* Vol. 52. DOI:10.1175/JAMC-D-12-086.1
- [32] Harrison G., Cradden L., Chick J. Preliminary assessment of climate change impacts on the UK onshore wind energy resource. 2008. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol 30, no. 14, pp. 1286-1299., 10.1080/15567030701839326
- [33] Najac J., Lac Ch., Terray L. Impact of climate change on surface winds in France using a statistical-dynamical downscaling method with mesoscale modeling. 2011, *International Journal of Climatology*. 31: 415-430 DOI: 10.1002/joc.2075

- [34] Nolan P., Lynch P., McGrath R., Semmler T., Wang Sh. Simulating climate change and its effects on the wind energy resource of Ireland. 2012, Wind Energy; 15: 593-608. DOI: 10.1002/we.489
- [35] Jimenez-Guerrero P, Montavez JP, Domínguez M, Romera R, Fernandes J, Liguori G, Cabos Narvaez W, Gaertner MA. Description of mean fields and interannual variability in an ensemble of RCM evaluation simulations over Spain: results from the ESCENA project. Climate Research 2013. ISSN: 0936-577X
- [36] Dee DP., Uppala SM., Simmons AJ., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda MA., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars ACM., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer AJ., Haimberger L., Healy SB., Hersbach H., Hólm EV., Isaksen L., Kallberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally AP., Monge-Sanz BM., Morcrette J-J., Park B-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. 2011. Quaterly JOurnal of the Royal Meteorological Society. 137:553-597, April 2011
- [37] <http://eca.knmi.nl/FAQ/index.php#0>
- [38] S. Herrera, S. L. Fita, J. Fernandez, and J.M. Gutierrez, 2010: Evaluation of the mean and extreme precipitation regimes from the ENSEMBLES regional climate multimodel simulation over Spain. J. Geophys. Res., 115, D21117, doi:10.1029/2010JD013936.
- [39] BACC Author Team, 2008: Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer Science & Business Media, 474pp., doi: 10.1007/978-3-540-72786-6
- [40] Cradden L.C., Harrison G. P., Chick J. P. Will climate change impact on wind power development in the UK?. 2012, Climate Change, DOI 10.1007/s10584-012-0486-5
- [41] Mahlstein I, Knutti R., Regional climate change patterns identified by cluster analysis. Climate Dynamics. 2010; 35: 587-600
- [42] Unal Y., Kindap T., Karaca M., Redefining the climate zones of Turkey using cluster analysis. 2003. International Journal of Climatology. 23: 1045-1055. DOI: 10.1002/joc.910.
- [43] Jacob D, Elizalde A, Haensler A, Hagemann S, Kumar P, Podzun R, Rechid D, Remedio AR, Saeed F, Sieck K, Teichmann C, Wilhelm C. Assessing the transferability of the regional climate model REMO to different coordinated regional climate downscaling experiment (CORDEX) regions. Atmosphere 2012; 3: 181–199.
- [44] Kaufmann P., Whiteman C. D., Cluster-analysis classification of wintertime wind patterns in the Grand Canyon region. 1999. Journal of

- Applied Meteorology. Vol. 38. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1131:CACOWW>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1131:CACOWW>2.0.CO;2)
- [45] Peña JC, Aran M, Cunillera J, Amaro J. Atmospheric circulation patterns associated with strong wind events in Catalonia. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2011; 11: 145–155. DOI: 10.5194/nhess-11-145-2011.
- [46] Lund R, Li B. Revisiting climate region definitions via clustering. *Journal of Climate* 2009; 22: 1787–1800. DOI: 10.1175/2008JCLI2455.1
- [47] Brewer S., Guiot J., Torre F., Mid-Holocene climate change in Europe: a data-model comparison. *Climate of the Past* 2007; 3; 499-512.
- [48] Lorente-Plazas R., Montávez J.P., Jimenez P.A., Jerez S., Gómez-Navarro J.J., García-Valero J.A., Jiménez-Guerrero P., Characterization of surface winds over the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology* 2014. DOI: 10.1002/joc.4034.
- [49] Vallée F., Brunieau G., Pirlot M., Deblecker O., Lobry J., Optimal wind clustering methodology for adequacy evaluation in system generation studies using nonsequential Monte Carlo simulation. 2011. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No. 4. DOI: 10.1109/TPWRS.2011.2138726
- [50] Tan P. N., Steinbach M., Kumar V., *Introduction to Data Mining*. 2006, Pearson Addison-Wesley
- [51] Gómez G., Cabos W. D., Liguori G., Sein D., Lozano-Galeana S., Fita L., Fernández J., Magariño E. E., Jiménez-Guerrero P., Montávez J. P., Domínguez M., Romera R., Gaertner M. A. Characterization of the wind speed variability and future change in the Iberian Peninsula and the Balearic Islands. 2016, *Wind Energy*; 19:1223-1237. DOI: 10.1002/we.1893
- [52] Salvador S., Chan P. Determining the Number of Cluster/Segments in Hierarchical Clustering/segmentation Algorithms. 2004. *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2004)*.
- [53] Sisodia D., Singh L., Sisodia S., Khushboo S., *Clustering Techniques: A Brief Survey of Different Clustering Algorithms*. 2012 *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)*. ISSN: 2278-621X
- [54] Stein B., Busch M., Density-based cluster algorithms in low dimensional and high-dimensional applications. 2005. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Text-Based Information Retrieval (TIR 05)*.
- [55] Mumtaz K., Duraiswamy K., An Analysis on Density Based Clustering of MultiDimensional Spatial Data. *Indian Journal of Computer Science and Engineering* Vol. 1 No. 1 8-12. ISSN: 0976-5166

- [56] Ertöz L., Steinbach M., Kumar V., Finding Clusters of Different Sizes, Shapes and Densities in Noisy, High Dimensional Data. 2003. Army High Performance Computing Research Center Technical Report Number 2003-102. PO Box 581459.
- [57] Von Luxburg U. A Tutorial on Spectral Clustering. 2006 Technical Report No. TR-149. Max-Planck Institut für biologische Kybernetik.
- [58] Pignataro N., Figueredo G., Introducción al Reconocimiento de Patrones Spectral Clustering. 2008
- [59] Bürk I., Spectral Clustering. 2012 University of Stuttgart. Bachelor Thesis
- [60] Lorente R., Caracterización del Viento en la Península Ibérica: Observaciones y Simulaciones Regionales. 2014. Universidad de Murcia
- [61] García de Pedraza L., Castillo J. M., Influencia de la configuración topográfica de la Península Ibérica en sus caracteres meteorológicos y climáticos. 1981. Paralelo 37º, nº 5
- [62] I. Font-Tullos. Climatología de España y Portugal. 2000 Ediciones Universidad de Salamanca, 2ª edición. ISBN: 84-7800-944-2
- [63] A., Hufty, Introduction à la climatologie, 1976 pag. 90, PUF, París.
- [64] Capel J. J. Los Climas de España. 1981 Oikos-tau S.A. ISBN 84-281-0492-1
- [65] Vallée F., Brunieau G., Pirlot M., Deblecker O., Lobry J. Optimal Methodology for Adequacy Evaluation in System Generation Studies Using Nonsequential Monte Carlo Simulation. IEEE Transactions on Power Systems. 2011. Vol. 26, No. 4,
- [66] Jolliffe I.T. Principal Component Analysis, Second Edition. 2002. Springer Series in Statistics. New York: Springer-Verlag Editions. ISBN 0-387-95442-2
- [67] Ding C., He X., K-means Clustering via Principal Component Analysis. 2004 Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning, Banff, Canada.
- [68] Xu Q., Ding C., Liu J., Luo B., PCA-guided search for K-means. Pattern Recognition Letters. 2015, 54 pag 50-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2014.11.07>
- [69] Perkins S.E., Pitman A.J., Holbrook N.J., McAneney J. Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. Journal of Climate 2007. DOI: 10.1175/JCLI4253.1.
- [70] Rokach L., Maimon O., Chapter 15 Clustering Methods. In Data Mining and Knowledge Discovery Handbook, Department of Industrial

- Engineering Tel-Aviv University. Springer, 2013. ISBN: 13978-0-387-24435-8.
- [71] Kalkstein L. S., Tan G. and Skindlov J. A. An evaluation of three clustering procedures for use in synoptic climatological classification. American Meteorological Society 1987.
- [72] Christensen JH., Kuhry P. High-resolution regional climate model validation and permafrost simulation for the East European Russian Artic. 2000, J. Geophys Res 105(D24):29647-29658.
- [73] Achberger C., Linderson M-L, Chen D. Performance of the Rossby centre regional atmospheric model in Southern Sweden: comparison of simulated and observed. Theor Appl Climatol 76:219-234.
- [74] Jacob D., Bärring L., Christesen O. B., Christesen J. H., de Castro M., Déqué M., Giorgi F., Hagemann S., Hirschi M., Jones R., Kjellström E., Lenderink G., Rockel B., Sánchez E., Schär C., Seneviratne S. I., Somot S., van Ulden A., van den Hurk B. An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. 2007, Climate Change, doi:10.1007/s10584-006-9213-4
- [75] De Castro M., Gallardo C., Jylha K., Tuomenvirta H. The use of a climate-type classification for assessing climate change effects in Europe from an ensemble of nine regional climate models. 2007, Climate Change 81:329-341. DOI 10.1007/s10584-006-9224-1.
- [76] Lohmann U., Sausen R., Bengtsson L., Cubasch U., Perlwitz J., Roeckner E. The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. 1993, Clim Res 3:177-193.
- [77] Leemans R., Cramer W., Van Minnen J. G. Prediction of global Biome distribution using bioclimatic equilibrium models. 1996, In: Breymeyer et al. (eds) SCOPE56 – Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands. Wiley, New York.
- [78] Fraederich K., Gerstengarbe F-W, Werner PC. Climate shifts during the last century. 2001, Climate Change 50:405-417.
- [79] Wang M., Overland J. E. Detecting Arctic climate change using Köppen climate classification. Clim. Change 67:43-62
- [80] Kottek M., Grieser J., Beck Ch., Rudolf B., Rubel F. World Map of the Köppen-geiger climate classification updated. 2006, Meteorologische Zeitschrift. Vol. 15, No. 3, 259-263.
- [81] Sparovek G., de Jong Van Lier Q., Dourado D. Computer assisted Köppen climate classification: a case study for Brazil. 2007 Int. J. Climatology 27: 257-266 DOI: 10.1002/joc.1384.
- [82] Departamento de Producción de la Agencia Estatal de Meteorología de España (Área de Climatología y Aplicaciones Operativas) y por el

Anexo II: Propuesta para Reducir la Incertidumbre de la Variable Climática

Departamento de Meteorología e Clima, Instituto de Meteorología de Portugal (Divisão de Observação Meteorológica e Clima). Atlas Climático Ibérico Temperatura del aire y precipitación (1971-2000). 2011, ISBN: 978-84.7837-079-5

- [83] Cannon A. J. Köppen versus the computer: comparing Köppen-Geiger and multivariate regression tree climate classifications in terms of climate homogeneity. 2012 Hydrology and Earth System Sciences, 16,217-229. Doi: 10.5194/hess-16-217-2012
- [84] Haylock M. R., Hofstra N., Klein Tank A. M. G., Klok E. J., Jones P. D., New M. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. 2008. Journal of Geophysical Research, Vol 113, D20119, Doi:10.1029/2008JD010201.